

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Vedran Zanchi**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:

Vedran Zanchi

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec na brojnim savjetima i riječima podrške pri izradi ovog rada.

Vedran Zanchi



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Vedran Zanchi**

Mat. br.: 0035191577

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Bilateralna usporedba mjerenja apsolutnog tlaka u području od 800 do 1100 hPa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Bilateral comparison of measurements in the absolute pressure range from 800 up to 1100 hPa**

Opis zadatka:

Mjerenje i umjeravanje je proces koji zahtijeva stalno potvrđivanje rezultata i iskazanih mjernih nesigurnosti. S ciljem otkrivanja sustavnih pogrešaka te dobivanja i održavanja akreditacije, umjerna laboratoriji uvode odgovarajuće mjere osiguranja kvalitete rezultata kao što su: sudjelovanje u međulaboratorijskim usporedbama, ponavljanje, praćenje i ocjenjivanje rezultata umjeravanja.

Svrha ovog rada je organizirati, provesti i analizirati međulaboratorijsku usporedbu umjernih laboratorija za tlak u području mjerenja tlaka okoline (barometarskog tlaka). U radu koristiti mjernu opremu Laboratorija za procesna mjerenja.

Potrebno je izraditi:

- Pregled osnova mjerenja tlaka okoline i umjeravanja barometara.
- Pregled normi i uputa za provedbu međulaboratorijskih usporedbi i obradu rezultata.
- Protokol usporedbe za tlak od 800 do 1100 hPa.
- Opis provedenih mjerenja u laboratorijima koji sudjeluju.
- Opis provedenih mjerenja u LPM-u i procjenu mjerne nesigurnosti.
- Analizu rezultata usporedbe određivanjem En vrijednosti.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

Predviđeni datum obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1 Metrologija.....	1
1.2 Tlak .....	2
2. METODOLOGIJA MJERENJA TLAKA.....	4
2.1 Općenito .....	4
2.2 Mjerenje tlaka okoline.....	8
2.2.1 Jednostavan živin barometar .....	8
2.2.2 Fortinov barometar .....	9
2.2.3 Kew barometar .....	10
2.2.4 Aneroidni barometar .....	12
2.2.5 Digitalni barometri .....	14
3. PRAVILA UMJERAVANJA MJERILA TLAKA .....	16
3.1 Mjerna nesigurnost .....	16
3.2 DKD (Njemačka služba za umjeravanje) .....	17
3.2.1 Referentni etaloni .....	18
3.2.2 Sukladnost umjeravanja .....	19
3.2.3 Uvjeti okoliša .....	19
3.2.4 Metode umjeravanja.....	20
3.2.5 Model mjerne nesigurnosti .....	22
3.3 EURAMET.....	26
3.3.1 Upute za umjeravanje tlačnih vaga .....	26
3.3.2 Upute za umjeravanje elektromehaničkih manometara .....	28
4. MEĐULABORATORIJSKE USPOREDBE .....	30
4.1 Upute EURAMET-a.....	30
4.2 Hrvatska akreditacijska agencija (HAA).....	31
4.2.1 Politika HAA.....	31
4.2.2 Pravila HAA.....	32
4.2.3 Pregled normi za akreditaciju.....	36
5. OPIS PROVEDENIH MJERENJA I ANALIZA REZULTATA .....	37
6. ZAKLJUČAK.....	48
LITERATURA.....	49

## POPIS SLIKA

Slika 1 – Odnos apsolutnih i manometarskih tlakova [6] .....	3
Slika 2 – Manometar u obliku U-cijevi [5] .....	4
Slika 3 – Jednostavna shema tlačne vage [7] .....	5
Slika 4 – Mjerni instrumenti koji koriste principe mehaničke deformacije [5] .....	6
Slika 5 – Klasifikacija načela mjerenja [5] .....	7
Slika 6 – Živin barometar [8] .....	8
Slika 7 – Utjecaj kapilarnosti na stupac vode i žive.....	9
Slika 8 – Fortinov barometar [5] .....	10
Slika 9 – a) dijelovi Kew barometra, b) Vernierova skala [8] .....	12
Slika 10 – Načelo rada aneroidne komore [8] .....	13
Slika 11 – Barograf [8] .....	13
Slika 12 – Mehanizam silicijskog kapacitivnog osjetnika [10].....	14
Slika 13 – Tip A [12].....	21
Slika 14 – Tip B [12].....	21
Slika 15 – Tip C [12].....	22
Slika 16 – Dijagram tijeka ocjenjivanja sheme ispitivanja sposobnosti [17].....	35
Slika 17 – PTB330, Vaisala (pogled izvana) .....	37
Slika 18 – PTB330, Vaisala (pogled iznutra).....	38
Slika 19 – Mjerna linija za umjeravanje u LPM-u .....	38
Slika 20 – Shematski prikaz mjerne linije u LPM-u [21] .....	39
Slika 21 – Tlačna vaga PG7601, Fluke Calibration .....	40
Slika 22 – Potvrda o umjeravanju, LPM, za tlak P1 .....	41
Slika 23 – Potvrda o umjeravanju, LPM, za tlak P2 .....	42
Slika 24 – Potvrda o umjeravanju, DHMZ (1/3).....	43
Slika 25 – Potvrda o umjeravanju, DHMZ (2/3).....	44
Slika 26 – Potvrda o umjeravanju, DHMZ (3/3).....	45
Slika 27 – Usporedba odstupanja i mjerne nesigurnosti za mjereni tlak P1 .....	46
Slika 28 – Usporedba odstupanja i mjerne nesigurnosti za mjereni tlak P2 .....	47

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1 – Intervali ponovnog umjeravanja (preporuka) [12] .....	18
Tablica 2 – Metode umjeravanja [12] .....	20
Tablica 3 – Uobičajene statistike za kvantitativne rezultate [17].....	34
Tablica 4 – Usporedba mjerne nesigurnosti i En vrijednosti za mjereni tlak P1 .....	46
Tablica 5 – Usporedba mjerne nesigurnosti i En vrijednosti za mjereni tlak P2 .....	47

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A$	$m^2$	Efektivna površina spremnika žive
$A_e$	$m^2$	Efektivna površina klipa
$B$	mmHg	Nekorigirano očitavanje barometra
$b$	mbar	Obnovljivost
$b'$	mbar	Ponovljivost
$C$	F	Kapacitet
$c_i$	-	Koeficijent osjetljivosti
$d$	m	Udaljenost između elektroda
$E_n$	-	Faktor odstupanja normaliziran u odnosu na iskazanu mjernu nesigurnost
$F$	N	Sila
$f$	-	Konverzijski faktor za mjerne jedinice
$f_0$	mbar	Odstupanje od nultočke
$g$	$m/s^2$	Lokalna gravitacijska konstanta
$h$	mbar	Histereza
$h_g$	m	Visina
$i$	mmHg	Indeks pogreška
$k$	-	Faktor pokrivanja
$P$	mmHg	Korigirano očitavanje barometra
$p$	Pa	Tlak
$p_M$	mbar	Nazivni tlak
$r$	mbar	Rezolucija
$S$	$m^2$	Površina elektrode
$T$	$^{\circ}C$	Temperatura mjernog instrumenta
$U$	mbar	Proširena mjerna nesigurnost
$u$	mbar	Standardna nesigurnost
$u_{etalon}$	mbar	Mjerna nesigurnost etalona
$u_r$	mbar	Mjerna nesigurnost rezolucije
$u_{f_0}$	mbar	Mjerna nesigurnost odstupanja od nultočke
$u_b$	mbar	Mjerna nesigurnost obnovljivosti
$u_{b'}$	mbar	Mjerna nesigurnost ponovljivosti
$u_h$	mbar	Mjerna nesigurnost histereze



---

$V$	$\text{m}^3$	Ukupni volumen žive
$\alpha$	$1/^\circ\text{C}$	Koeficijent ekspanzije žive
$\beta$	$1/^\circ\text{C}$	Linearna ekspanzija mjerne skale
$\varepsilon_0$	F/m	Dielektrična konstanta vakuuma
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća fluida
$\varphi$	$^\circ$	Geografska širina za objekt gdje se provodi ispitivanje
$\Delta p$	mbar	Pad tlaka

---

**SAŽETAK**

U okviru ovog rada, dan je pregled osnovne metodologije mjerenja tlaka, s naglaskom na mjerenje tlaka okoline (barometarskog tlaka) i koncept određivanja mjerne nesigurnosti. Osim toga, prikazana su pravila umjeravanja mjernih instrumenata te pregled normi i uputa za provedbu međulaboratorijskih usporedbi i obradu rezultata.

Nadalje, rad opisuje provedbu bilateralne usporedbe umjeravanja apsolutnog tlaka u području od 800 do 1100 hPa. Cilj usporedbe je ocijeniti učinkovitost umjeravanja laboratorija primjenom proračuna mjerne nesigurnosti i  $E_n$  vrijednosti. Laboratoriji koji sudjeluju u usporedbi su Laboratorij za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, te umjerni laboratorij Državnog hidrometeorološkog zavoda. Objekt umjeravanja je bio digitalni barometar PTB330, Vaisala. Prikaz rezultata je dan tablično i grafički te komentiran.

Ključne riječi: atmosferski tlak, barometar, mjerenje, umjeravanje, mjerna nesigurnost, međulaboratorijska usporedba,  $E_n$  vrijednost

---

**SUMMARY**

In this diploma work, an overview of pressure measurement methodology is given, with an emphasis on ambient (barometric) pressure measurement and the concept of measurement uncertainty determination. In addition, the calibration guidelines for measuring instruments are presented, as well as an overview of norms and guidelines for the implementation of interlaboratory comparisons and processing of results. Furthermore, the paper describes the protocol of a bilateral comparison of calibration of the absolute pressure in the range of 800 to 1100 hPa. The purpose of the comparison was to evaluate the efficiency of laboratory calibration by calculating specific measurement uncertainties and corresponding  $E_n$  scores. The participant laboratories in the bilateral comparison are The laboratory for process measurement (LPM) at Faculty of mechanical engineering and naval architecture and the calibration laboratory of the Meteorological and Hydrological Service. The object of calibration was a digital barometer PTB330, Vaisala. The results are presented via tables and diagrams and commented on.

Key words: atmospheric pressure, barometer, measurement, calibration, measurement uncertainty, interlaboratory comparison,  $E_n$  score

## 1. UVOD

Industrijski razvoj se sada suočava s izazovima i mogućnostima jedinstvenih veličina i raznolikosti. Ekonomični proizvodni procesi za postojeće ili nove proizvode, nova razvojna istraživanja i trendovi tehnologije, globalizacija, te uvjeti tržišnog natjecanja zahtijevaju inovativna i vizionarska rješenja. U mnogim slučajevima, optimalna iskorištenost energije i sirovina, kvaliteta proizvoda te pouzdanost pogona postrojenja bitno ovise o sposobnosti kontrole osnovnih operacija i parametara. Parametri od središnje važnosti u tom smislu su tlak i temperatura. Njihova jednostavna i točna mjerenja postaju sve važnija u mnogim područjima tehnologije i svakodnevnog života. Neophodni su u sustavima grijanja i klimatizacije, prehrambenoj industriji i biotehnologiji, te općenito strojarskim postrojenjima. Isto se odnosi i na laboratorije za mjerenje i ispitivanje te na opremu potrebnu za provođenje eksperimenata u svrhu istraživanja prirodnih znanosti i tehnologije. Uspjeh mjerenja i kontrole u navedenim područjima uvelike ovisi o raspoloživosti kvalitetnih mjernih metoda i ispitnih objekata [1].

### 1.1 Metrologija

Metrologija ili mjeriteljstvo je znanost o mjerenju i njegovim primjenama. Kao znanstvena disciplina nastala je iz veoma praktičnih razloga. To je temeljna potreba da se nešto može izmjeriti. Ispravnim se mjerama od početaka ljudske civilizacije priznavala posebna društvena važnost te su se one propisivale s najvišim autoritetom državnih vladara. Vladari su utvrđivali osnovne mjere (etalone) kako bi se mogla odvijati trgovina i gospodarske djelatnosti [2]. Metrologija obuhvaća tri glavna zadatka [3]:

1. Definiranje međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica (npr. metra).
2. Ostvarenje mjernih jedinica putem znanstvenih metoda (npr. ostvarenje metra korištenjem lasera).
3. Utvrđivanje lanca sljedivosti pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i točnosti mjerenja i prenošenju toga znanja (npr. dokumentirani odnos između mikrometarskog vijka u trgovini tehničke robe i primarnog laboratorija za optičku metrologiju duljine).

Metrologija predstavlja suštinski dio u znanstvenom istraživanju, a znanstveno istraživanje čini temelj razvoja same metrologije. Dijeli se na tri kategorije s različitim razinama složenosti te točnosti [3]:

1. Znanstvena metrologija bavi se organizacijom i razvojem mjernih etalona te njihovim održavanjem (najviša razina).
2. Industrijska metrologija treba osigurati prikladno funkcioniranje mjerila koja se upotrebljavaju u industriji, tj. u procesima proizvodnje i ispitivanja.
3. Zakonska metrologija bavi se mjerenjima koja utječu na transparentnost gospodarskih transakcija, naročito tamo gdje postoji potreba za zakonskom verifikacijom mjernog instrumenta.

Temeljna metrologija nema međunarodnu definiciju, no obično označava najveću razinu točnosti unutar određenog područja. Prema tome, može se opisati kao najviša grana znanstvene metrologije.

## 1.2 Tlak

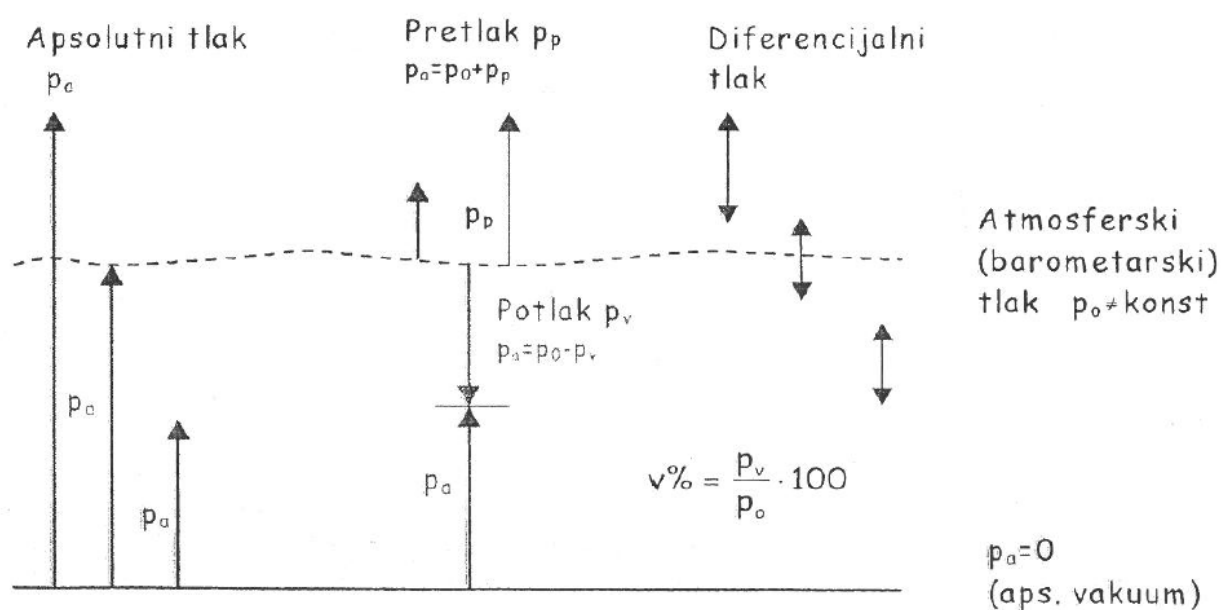
Tlak se definira kao normalna sila koja djeluje na jedinicu površine sustava. Za fluidne sustave tlak na površinu spremnika ili površinu mjerne membrane posljedica je kumulativnog efekta djelovanja molekula koje udaraju na stijenku spremnika, izazivajući pri tomu normalnu silu na stijenku [4]. Definiran je jednadžbom:

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (1)$$

Ako neko tijelo ne bi sadržavalo nikakve molekule, tlak bi bio nula. Tlakovi izmjereni na ljestvici koja koristi ovu nultu vrijednost kao referentnu točku, nazivaju se apsolutnim tlakovima. Atmosferski tlak na površini Zemlje varira, no njegova prosječna vrijednost je  $10^5$  Pa (1000 mbar); to je zapravo  $10^5$  Pa apsolutnog tlaka jer se izražava s obzirom na prethodno spomenutu referentnu točku nultog tlaka [5]. Za probušenu automobilsku gumu se često kaže da nema više zraka te bi spojeni mjerač tlaka pokazivao nultu vrijednost, dok još očigledno guma sadrži atmosferski zrak. Ovakva mjerenja koriste tlak okoline kao referentnu vrijednost i mjere tzv. manometarski tlak odnosno pretlak.

$$\text{Apsolutni tlak} = \text{tlak okoline} + \text{pretlak} \quad (2)$$

U nekim slučajevima mjeri se i tzv. podtlak odnosno negativan manometarski tlak, no s obzirom da koncept negativnog tlaka nema smisla, koristi se naziv vakuumski tlak. Osim toga, u primjenama gdje je potrebno poznavanje razlike tlaka između dva sustava, referentni tlak ne mora nužno biti nula ili atmosferski tlak, već je obično to neka druga vrijednost. Takva razlika tlaka se zove diferencijalni tlak. Primjer je definiranje vrijednosti protoka plina u nekom cjevovodnom sustavu koji ovisi o razlici vrijednosti tlaka na ulazu i izlazu u cjevovod. U svrhu izbjegavanja pogrešnih zaključaka tijekom mjerenja, od iznimne je važnosti definirati kakvo mjerenje se provodi: apsolutno, manometarsko, ili diferencijalno [5]. Na slici 1 prikazan je odnos apsolutnih i manometarskih tlakova.

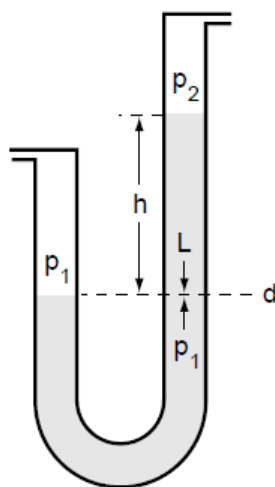


Slika 1 – Odnos apsolutnih i manometarskih tlakova [6]

## 2. METODOLOGIJA MJERENJA TLAKA

### 2.1 Općenito

U instrumentima za mjerenje tlaka primjenjuje se niz poprilično različitih načela. Jedna od najstarijih metoda mjerenja tlaka (a ujedno i do današnjeg dana najtočnijih) je pomoću mjerenja visine stupca tekućine. Manometar na slici 2 je zapravo U-cijev ispunjena tekućinom gdje se na temelju razlike visina između površina tekućine zaključuje o vrijednostima tlaka.



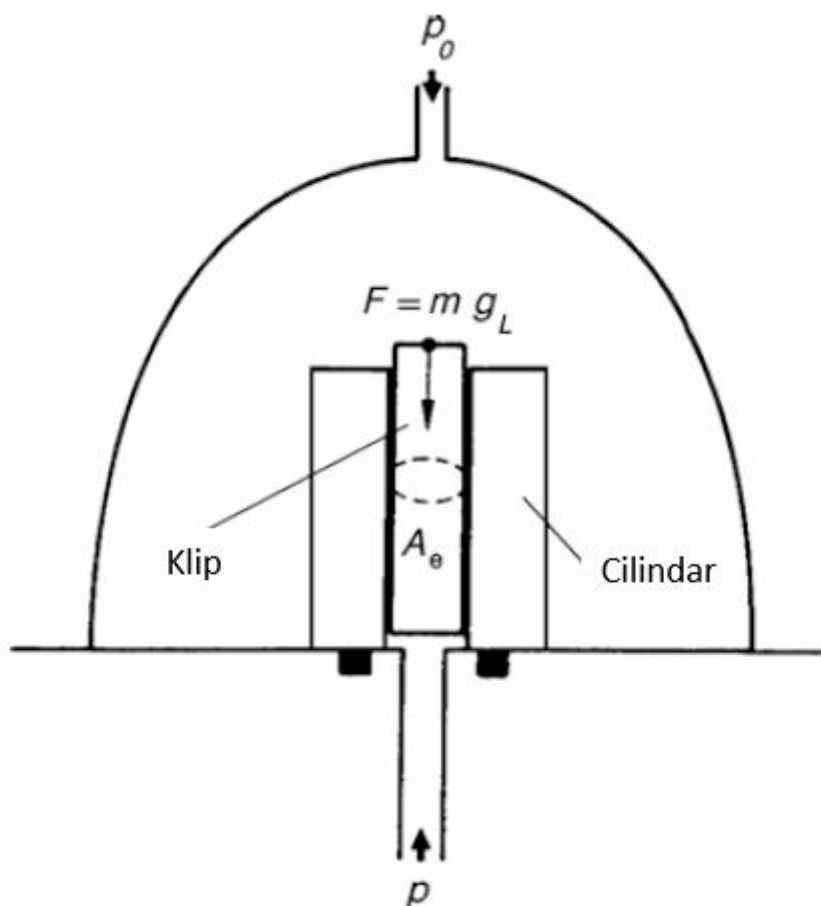
Slika 2 – Manometar u obliku U-cijevi [5]

Na referentnoj razini  $d$ , ravnoteža tlaka je ostvarena tlakom  $L$ , koji se sastoji od hidrostatskog tlaka tekućine i tlaka  $p_2$  na vrhu cijevi, te tlakom  $p_1$  prema kojem je otvoren drugi dio cijevi. Uslijed njihove promjene, mijenja se i visina  $h$  prema kojoj se određuje nova vrijednost tlaka. Jednadžba ravnoteže glasi:

$$p_1 = \rho gh + p_2 \quad (3)$$

U slučaju da je gornji dio cijevi evakuiran i zatvoren, tlak  $p_2$  ima vrijednost nula, te se instrument naziva barometrom. Tekućine koje se koriste u ovakvim mjernim instrumentima su obično živa, voda ili ulje, a u slučaju barometra uvijek živa zbog činjenice da ima više od 13 puta veću gustoću od vode ili ulja te je shodno tome visina stupca iznosi oko 0,75 m za potrebe mjerenja tlaka okoline.

Ovakva ideja ravnoteže tlakova se može proširiti i za primjenu pri višim i nižim tlakovima koristeći metalne utege koji djeluju poznatom silom na poznatu površinu. Takva mjerila se zovu tlačne vage i to su ujedno najtočnija mjerila tlaka koja se koriste kao etaloni za ostala mjerila. Jednostavna shema je prikazana na slici 3.

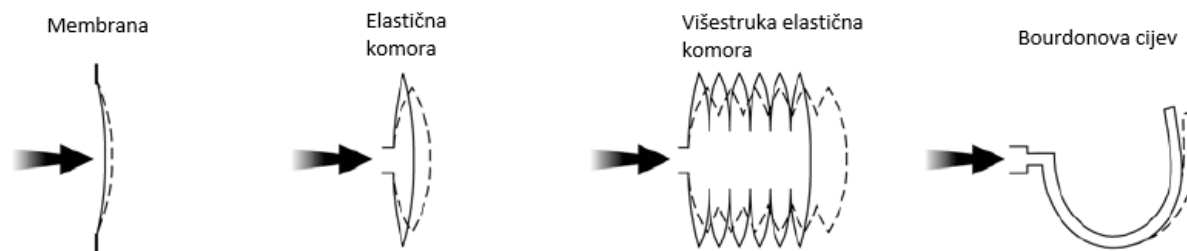


Slika 3 – Jednostavna shema tlačne vage [7]

Tlak se mjeri pod uvjetima ravnoteže između sile koja je posljedica mase, te sile koja djeluje sa suprotne strane klipa uslijed djelovanja tlaka na efektivnu površinu  $A_e$ . Gradijent tlaka je funkcija geometrije sklopa klip/cilindar, njihovog materijala, područja tlaka te vrsti fluida koji se koristi. Uvjet ravnoteže je uspostavljen kada klip i dodatni standardni utezi (koji se po potrebi postavljaju na klip) plutaju i slobodno se rotiraju uslijed tlaka fluida s druge strane klipa. Plutanje klipa je funkcija tlaka, temperature te geometrije sklopa klip/cilindar.



Nadalje, tlak se može odrediti mjerenjem mehaničke deformacije senzora koji prolazi kroz elastičnu deformaciju promjenom tlaka. Mehanički otklon može se provesti i osjetiti nizom metoda. Jedna od najčešćih vrsta pokretnih mehaničkih dijelova je elastična membrana. Drugi primjer je Bourdonova cijev gdje unutarnji tlak uzrokuje deformaciju zakrivljene cijevi. Slika 4 prikazuje često korištene mjerne instrumente koji koriste principe mehaničke deformacije.

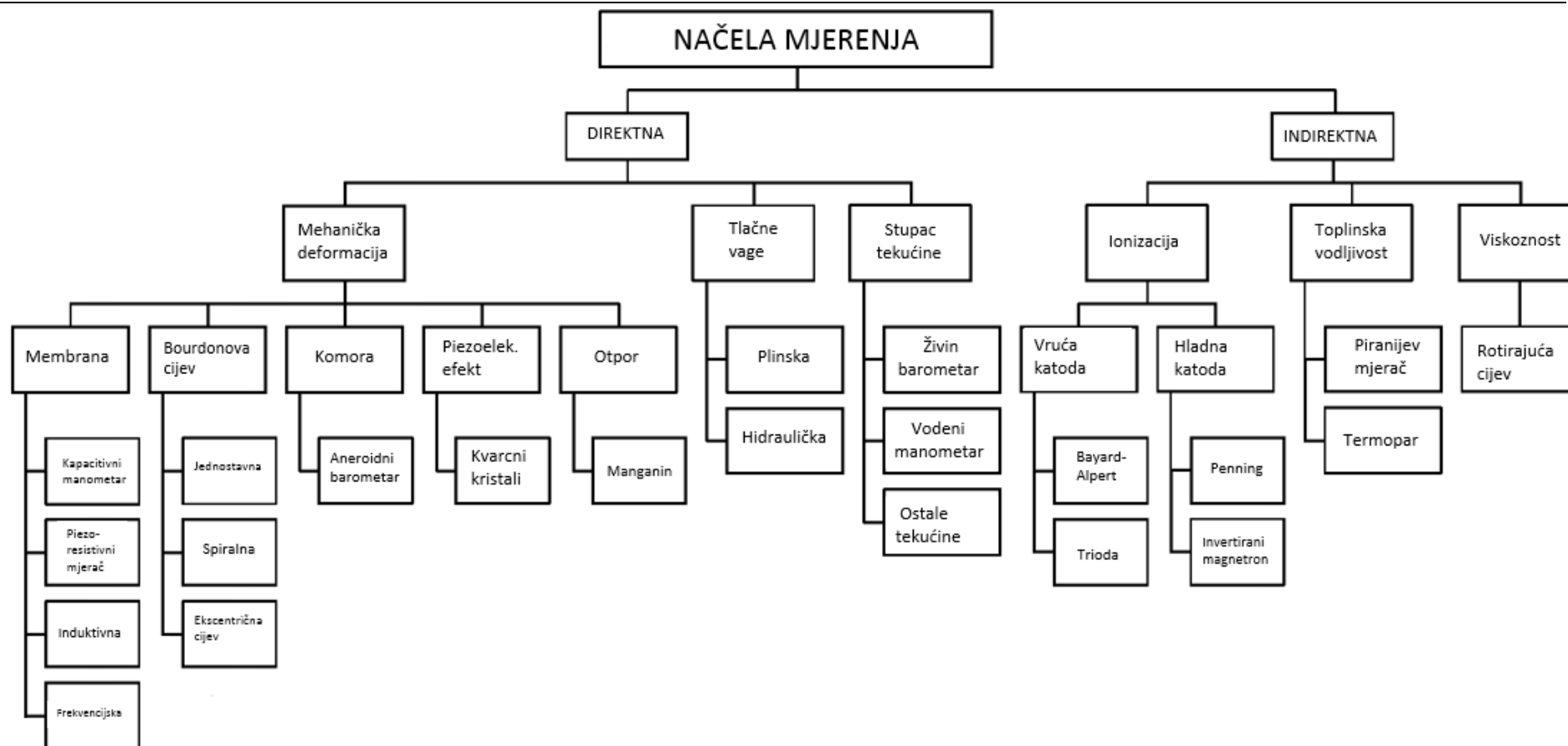


**Slika 4 – Mjerni instrumenti koji koriste principe mehaničke deformacije [5]**

Mehanička deformacija može se osjetiti na brojne načine: serijom mehaničkih poluga za izravan prikaz deformacije, primjenom mjernih instrumenata koji mijenjaju električni otpor uslijed naprezanja, mjerenjem električnog kapaciteta, promjenom frekvencije rezonantnog elementa uslijed kompresije, itd.

U slučajevima niskog tlaka gdje su mehanička odstupanja premala za izmjeriti, primjenjuju se tzv. indirektne metode koje mjere fizikalna svojstva poput toplinske vodljivosti, ionizacije ili viskoznosti.

Slika 5 prikazuje jednu moguću klasifikaciju metodologije mjerenja. Metode koje se koriste samo u rijetkim slučajevima su izostavljene. Treba napomenuti da je ovo samo jedan od mnogih prikaza širokog raspona tlačnih i vakuumskih mjernih instrumenata te ih se svakako može i na druge načine grupirati [5].



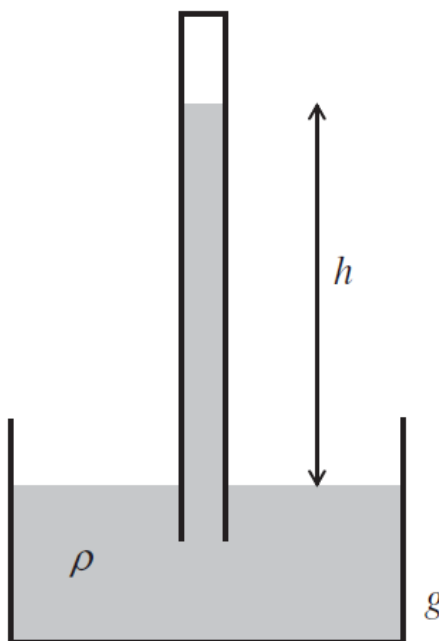
Slika 5 – Klasifikacija načela mjerenja [5]

## 2.2 Mjerenje tlaka okoline

Barometar je mjerni instrument koji se primjenjuje u meteorologiji za mjerenje tlaka okoline. Koristi se preko tri stoljeća, a može poslužiti i za predviđanje vremena. Tradicionalno se dijeli na tekućinske i aneroidne barometre, no danas postoje i druge varijante.

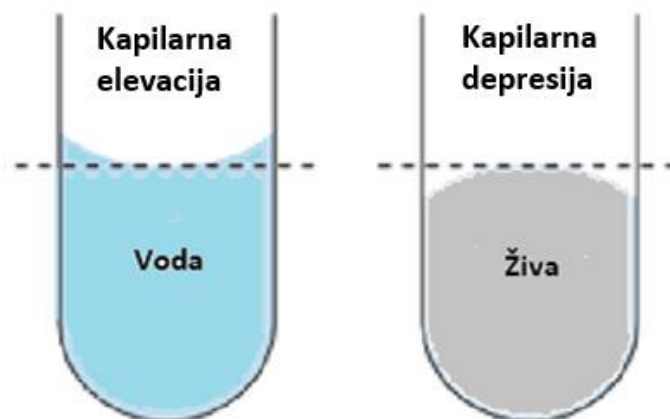
### 2.2.1 Jednostavan živin barometar

Princip rada je istovjetan primjeru manometra u obliku U-cijevi. Poznavanje visine  $h$  i gustoće  $\rho$  stupca tekućine te gravitacijske konstante  $g$  neophodno je za određivanje atmosferskog tlaka.



Slika 6 – Živin barometar [8]

Osim veće gustoće, prednosti žive su i manji tlak pare pri potrebnim temperaturama, te jednostavnost čišćenja. Također, za razliku od vode, živa ima povoljniji utjecaj kapilarnosti, tj. konveksan oblik površine tekućine zbog jačih vrijednosti kohezivnih sila u odnosu na adhezivne pa je lakše odredit mjereni podatak.

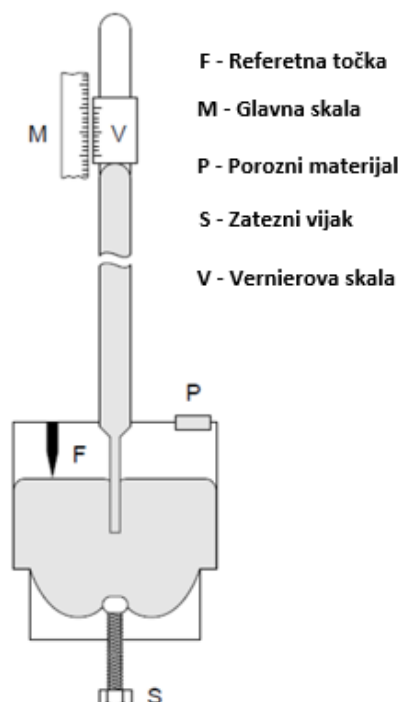


Slika 7 – Utjecaj kapilarnosti na stupac vode i žive

Nedostatak korištenja žive je svakako njezina otrovnost zbog koje treba bit oprezan prilikom transporta. Osim toga, živa pokazuje i primjetno toplinsko širenje.

### 2.2.2 Fortinov barometar

Fortinovi barometri mjere tlak samo unutar normalnog atmosferskog raspona. Uz pravilno rukovanje, vrlo su pouzdani. Visina stupca žive mjeri se primjenom Vernierove skale čija se nula podudara s referentnom točkom unutar spremnika žive. Razina žive u spremniku podešava se okretanjem zateznog vijka koji steže kožnu vrećicu do trenutka postizanja željene razine žive u spremniku. Konačna količina žive u Fortinovom barometru nije presudan faktor. Kontakt s atmosferom je ostvaren kroz porozan materijal na otvoru spremnika. Osim korekcija prilikom umjeravanja, potrebno je uzeti u obzir korekcije temperature instrumenta i lokalne vrijednosti gravitacijske konstante na očitavanja s Vernierove skale [5]. Slika 8 prikazuje izvedbu Fortinovog barometra.



Slika 8 – Fortinov barometar [5]

### 2.2.3 Kew barometar

Najčešće korišten instrument za klimatološka mjerenja je Kew barometar. Princip rada je vrlo sličan Fortinovom. Razlika je spremnik fiksnog volumena, zbog kojeg je skala skraćena u svrhu kompenzacije zbog promjene atmosferskog tlaka. Ovakva vrsta barometra može mjeriti tlakove u rasponu od nekoliko milibara pa do reda veličine atmosferskog tlaka. U svrhu primjene korekcija, temperatura zraka se mjeri termometrom koji je pričvršćen za barometar. Kew barometar umjeren je za primjenu pri temperaturi zraka od  $0^{\circ}\text{C}$  te standardne vrijednosti gravitacijske konstante  $g$  od  $9,80665 \text{ m/s}^2$  [8]. U praksi, međutim, mjerenja se izvršavaju u okolnostima koja se razlikuju od ovih uvjeta te je shodno tome potrebno izvršiti potrebne korekcije radi uvjeta preciznosti mjerenja. Korekcije uzimaju u obzir utjecaj temperature na gustoću žive, lokalnu vrijednost gravitacije konstante, te nepravilnosti cijevi i skale barometra koje su dane od proizvođača. Jednadžba (4) prikazuje korekciju radi ekspanzije žive te mjerne skale [8]:

$$P = \frac{g}{9,80665} \left\{ B + i - B * \left[ \frac{(\alpha - \beta)T}{1 + \alpha T} \right] - f * \frac{V}{A} (\alpha - 3 * 10^{-5})T \right\} \quad (4)$$

gdje je:

$P$  – korigirano očitavanje barometra [mmHg]

$B$  – nekorigirano očitavanje barometra [mmHg]

$i$  – 'indeks pogreška' obuhvaća pogreške kod kapilara, mjerne skale i vakuuma [mmHg]

$\alpha$  – koeficijent ekspanzije žive [1/°C]

$\beta$  – linearna ekspanzija mjerne skale [1/°C]

$T$  – temperatura mjernog instrumenta [°C]

$V$  – ukupni volumen žive [mm<sup>3</sup>]

$A$  – efektivna površina spremnika žive [mm<sup>2</sup>]

$f$  – konverzijski faktor za mjerne jedinice (vrijednost iznosi 1 za mjernu skalu u mmHg) [-]

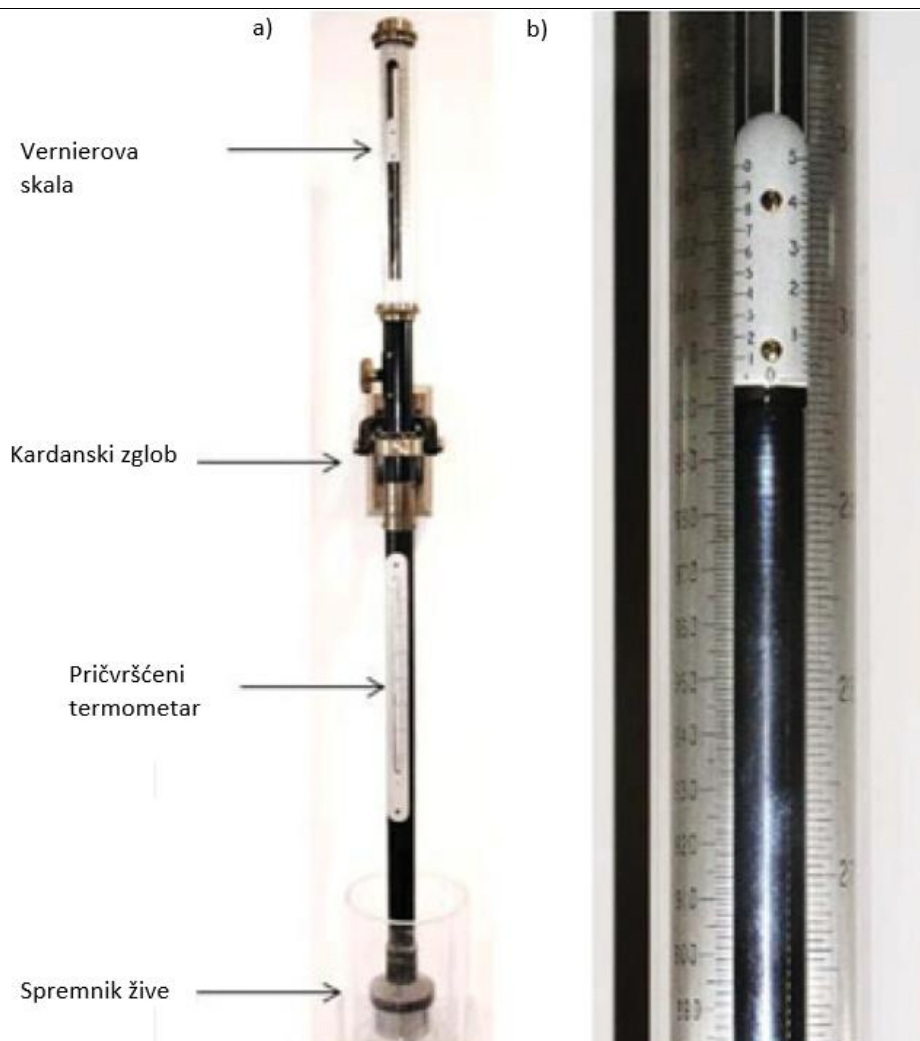
Lokalna gravitacijska konstanta u m/s<sup>2</sup> je definirana kao:

$$g = [9,80616 * (1 - 2,6373 * 10^{-3} \cos 2\varphi + 5,9 * 10^{-6} \cos^2 2\varphi)] - 3,086 * 10^{-4} * h_g \quad (5)$$

gdje je:

$\varphi$  – geografska širina za objekt gdje se provodi ispitivanje

$h_g$  – visina [m]

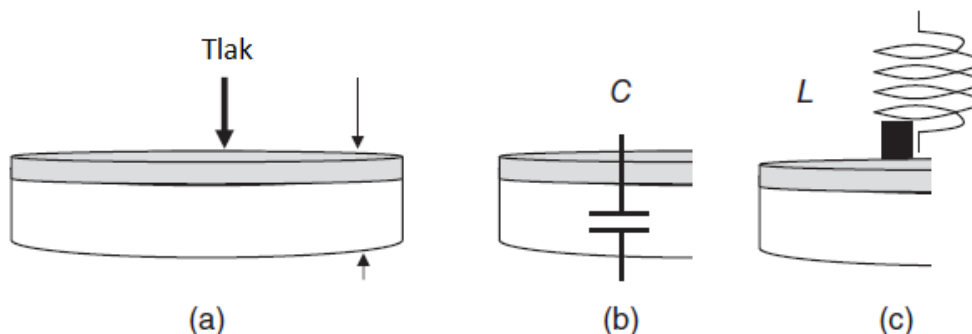


Slika 9 – a) dijelovi Kew barometra, b) Vernierova skala [8]

#### 2.2.4 Aneroidni barometar

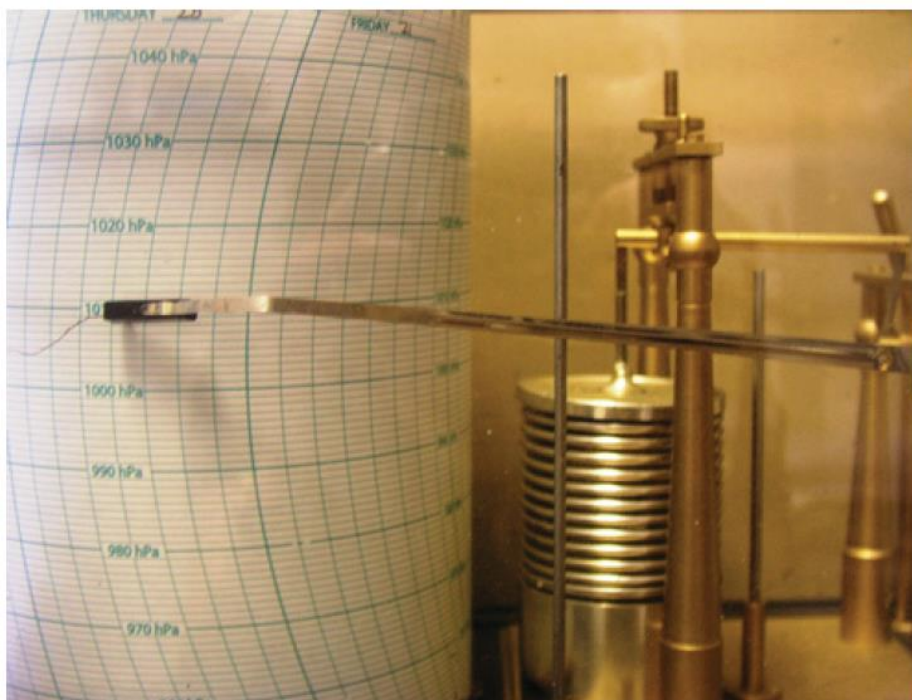
Aneroidni barometri prikladniji su za upotrebu od živinih barometra, te sigurniji zbog izbjegnutih opasnosti povezanih sa živom. Osjetnik u aneroidnom barometru je mala evakuirana metalna komora ili membrana, koja je sklona izobličenju uslijed djelovanja atmosferskog tlaka. Promjena dimenzija osjetnika se prati mehaničkim ili električnim putem, kroz promjene kapaciteta ili induktiviteta. Cijena osjetnika je jeftina, stoga imaju široku primjenu u zidnim kućanskim barometrima, mjeracima visinske razlike te barografima [8]. U ovakvim instrumentima, pomicanje aneroidne komore se pretvara u pomak pokazivača mehanizmom poluga. Svojstva mehanizma ograničavaju preciznost pokazivača na mjernoj skali, jer može doći do histereze ili prijanjanja. Na slici 10 je prikazano načelo rada aneroidne komore gdje dolazi do vertikalne deformacije uslijed promjene tlaka (a). Električni osjetnik

može na temelju utjecaja deformacije mijenjati parametre koji definiraju kapacitet  $C$  (b) ili premještati propusnu jezgru unutar zavojnice žice koja uzrokuje induktivitet  $L$  (c).



**Slika 10 – Načelo rada aneroidne komore [8]**

U slučaju barografa, izvedba se sastoji od više elastičnih komora spojenih zajedno u svrhu bolje osjetljivosti pri mjerenju iznosa tlaka. Sustavom poluga mehanički otklon se povećava i prenosi na pero koje bilježi tlak na barografskoj vrpci omotanoj oko bubnja. Barograf je važan jer pruža mogućnost praćenja tendencije promjene atmosferskog tlaka u nekom vremenskom intervalu.

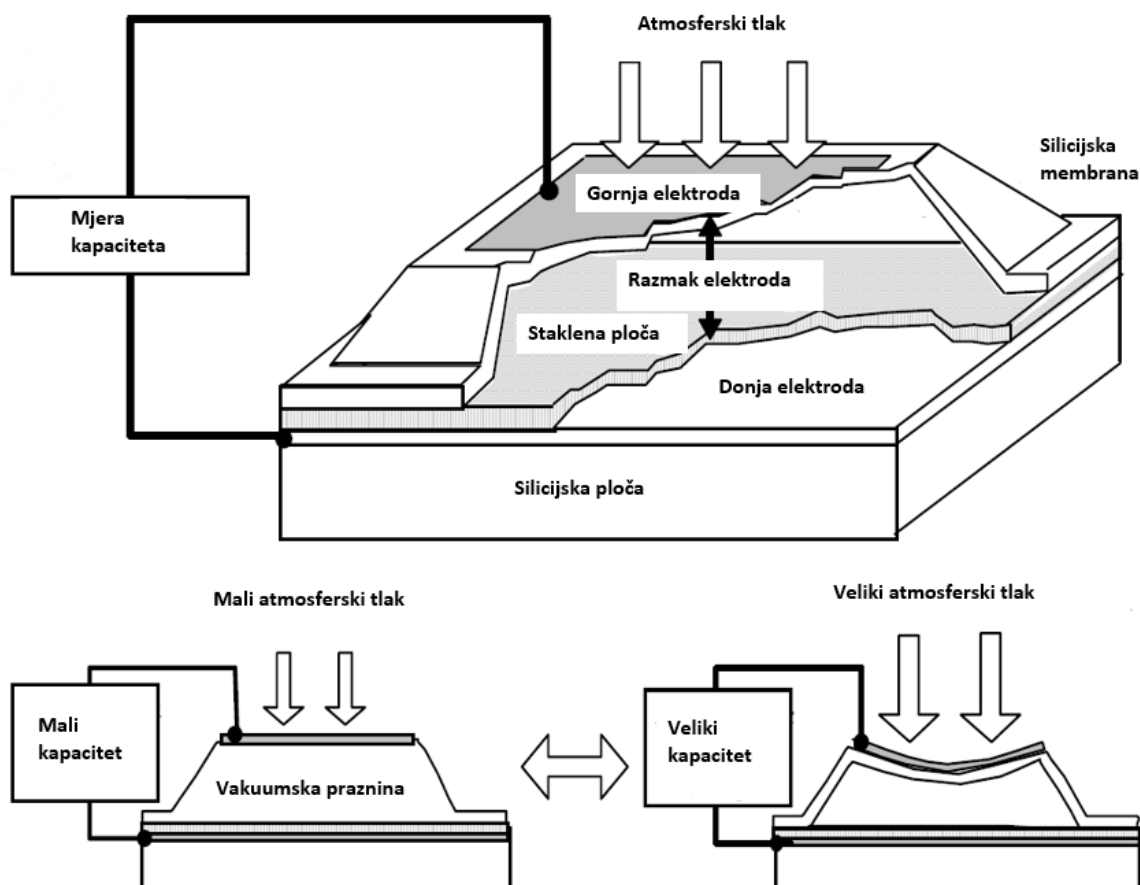


**Slika 11 – Barograf [8]**



### 2.2.5 Digitalni barometri

Predstavljaju novu generaciju barometara, konstruiranu za širok spektar naprednog mjerenja atmosferskog tlaka. Princip rada im se temelji na silicijskom kapacitivnom osjetniku koji mjeri tlak pomoću deformacije silicijske membrane. Kako se atmosferski tlak mijenja, dolazi do savijanja membrane čime se povećava ili smanjuje visina vakuumske praznine u osjetniku. Suprotne strane vakuumske praznine djeluju kao elektrode i promjenom njihove međusobne udaljenosti dolazi do promjene kapaciteta osjetnika. Na temelju kapaciteta se potom dobiva informacija o tlaku [9]. Na slici 12 prikazan je mehanizam silicijskog kapacitivnog osjetnika.



Slika 12 – Mehanizam silicijskog kapacitivnog osjetnika [10]

---

Jednadžba kapaciteta glasi:

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (6)$$

gdje je:

$S$  – površina elektrode [m<sup>2</sup>]

$d$  – udaljenost između elektroda [m]

$\varepsilon$  – dielektrična konstanta vakuuma [F/m]

### 3. PRAVILA UMJERAVANJA MJERILA TLAKA

Umjeravanje je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima [6].

#### 3.1 Mjerna nesigurnost

Kada se iskazuje rezultat nekog mjerenja fizikalne veličine, nužno je dati kvantitativnu indikaciju kvalitete rezultata sa svrhom procjene pouzdanosti. Bez takve indikacije nemoguće je adekvatno usporediti rezultate mjerenja. Stoga, potreban je lako razumljiv i opće prihvaćen postupak za obilježavanje kvalitete rezultata mjerenja, odnosno za procjenu i izražavanje njezine nesigurnosti [11]. Koncept nesigurnosti kao kvantificirajućeg svojstva je relativno nov u mjeriteljstvu, premda su pogreška i analiza pogrešaka već dugo dio tehnike mjerenja. Značenje riječi 'nesigurnosti' je sumnja, stoga u najširem smislu 'mjerna nesigurnosti' znači sumnja u valjanost rezultata mjerenja.

Nesigurnost rezultata mjerenja odražava nedostatak znanja o veličini koja se mjeri. Rezultat mjerenja poslije korekcije uslijed utvrđenih sustavnih djelovanja je još uvijek samo procjena mjerene veličine zbog nesigurnosti koja proizlazi iz slučajnih učinaka i nesavršenosti same korekcije. Važno je napomenuti da mjerni rezultat može biti jako blizu stvarne vrijednosti mjerene veličine, a da pritom sadrži veliku nesigurnosti. Prema tome, ne smije se miješati nesigurnost rezultata s pojmom pogreške. U praksi, postoje mnogi izvori nesigurnosti u mjerenju [11]:

- nepotpuna definicija mjerene veličine
- nesavršeno ostvarenje definicije mjerne veličine
- nereprezentativno uzorkovanje, izmjereni uzorak ne mora predstavljat definiranu mjerenu veličinu
- nedovoljno poznavanje utjecaja okoliša na mjerenje ili nesavršeno mjerenje okolišnih uvjeta
- osobna pristranost prilikom očitavanja s analognih instrumenata
- konačno razlučivanje instrumenta ili prag sposobnosti razlikovanja
- netočne vrijednosti mjernih etalona i referentnih materijala
- netočne vrijednosti konstanta i ostalih parametara preuzetih iz vanjskih izvora
- aproksimacije i pretpostavke korištene u mjernom postupku i metodi
- varijacije u ponovljenom promatranju mjerene veličine u očigledno istim uvjetima

Naravno, neutvrđena sustavna djelovanja ne mogu se uzeti u obzir u procjeni mjerne nesigurnosti, no doprinose njezinoj pogrešci.

Standardna nesigurnost rezultata mjerenja kad se on dobiva iz vrijednosti više drugih veličina, naziva se kombiniranom standardnom nesigurnošću i označava s  $u_c$ . To je procijenjeno standardno odstupanje pridruženo rezultatu i jednako je pozitivnom drugom korjenu kombinirane varijance dobivene iz svih varijantnih i kovarijantnih komponenti koje su dobivene pomoću zakona prijenosa nesigurnosti [11]. Kako bi se zadovoljile potrebe nekih industrijskih i komercijalnih primjena, kao i zahtjevi u području zdravlja i sigurnosti, uvodi se proširena nesigurnost  $U$  koja se dobiva množenjem kombinirane standardne nesigurnosti  $u_c$  s faktorom pokrivanja  $k$ . Namjeravana svrha proširene mjerne nesigurnosti je pružanje intervala mjernom rezultatu za koji se može očekivati da obuhvaća velik dio razdiobe vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini. Izbor faktora pokrivanja  $k$  (koji obično iznosi 2 ili 3) temelji se na vjerojatnosti pokrivanja ili razini povjerenja koja se zahtjeva od intervala.

Ako se mijenjaju sve veličine o kojima ovisi rezultat mjerenja, mjerna nesigurnost može se odrediti statističkim metodama. Međutim, s obzirom da je to rijetko moguće u praksi zbog ograničenog vremena i resursa, mjerna nesigurnost se obično procjenjuje korištenjem matematičkog modela mjerenja i zakona prijenosa nesigurnosti. Budući da matematički model može bit nepotpun, sve relevantne količine trebaju se mijenjati u najvećoj mogućoj mjeri kako bi se procjena nesigurnosti mogla temeljiti što je više moguće na promatranim podacima. Kad god je to moguće, primjena empirijskih modela mjerenja utemeljena na dugoročnim kvantitativnim podacima, kao i primjena kontrolnih karata koje mogu ukazivati je li mjerenje pod statističkom kontrolom, trebala bi biti dio nastojanja da se dobiju pouzdane procjene nesigurnosti. Matematički model uvijek bi se trebao revidirati kada promatrani podaci, uključujući rezultate neovisnih zaključaka iste mjerenje veličine, pokazuju da je model nepotpun. Dobro zamišljeni eksperiment može uvelike olakšati pouzdane procjene nesigurnosti te predstavlja važan dio mjeriteljskog umijeća.

### 3.2 DKD (Njemačka služba za umjeravanje)

Od svog osnutka 1977., DKD (Deutscher Kalibrierdienst) je okupio laboratorije za umjeravanje industrijskih poduzeća, istraživačkih instituta, tehničkih vlasti, inspeksijskih i ispitnih instituta [12]. Smjernice DKD-a su dokumenti o zahtjevima norme DIN EN ISO/IEC 17025 koja definira opće zahtjeve za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija. Smjernice sadrže opis

tehničkih, procesnih i organizacijskih postupaka koji akreditirani umjerni laboratoriji koriste kao model za definiranje internih procesa i propisa. Primjenom smjernica osigurana je ravnopravnost umjeravanja uređaja u različitim umjernim laboratorijima i njihova međusobna usporedivost. Odstupanja od smjernica su dopuštena u slučaju dogovora s akreditacijskim tijelom ako postoje tehnički razlozi za podupiranje dotične promjene.

Smjernicama se utvrđuju minimalni zahtjevi za postupak umjeravanja i procjenu mjerne nesigurnosti mjernih instrumenata. Vrste mjerila tlaka koji su obuhvaćeni DKD-om su Bourdonove cijevi, električna mjerila tlaka te pretvornici tlaka s električnim izlazom. Za umjeravanje pretvornika tlaka s električnim izlazom potreban je pomoćni mjerni uređaj akreditiranog laboratorija koji služi za pretvorbu električnog signala u vidljivi prikaz. U tom slučaju potrebno je i uzeti u obzir pripadajuću mjernu nesigurnost pomoćnog uređaja. Da bi se osigurala sljedivost, pomoćni mjerni uređaji moraju bit umjereni i mora bit dostupna izjava o mjernoj nesigurnosti.

### 3.2.1 Referentni etaloni

Umjeravanje se vrši izravnom usporedbom mjernih vrijednosti objekta umjeravanja s vrijednostima koje daje mjerni etalon. Referentni etaloni koji se koriste su tlačne vage i visokokvalitetni tekućinski manometri, ili električna mjerila tlaka. Takvi etaloni umjeravaju se u propisanim redovitim razmacima te imaju certifikate o umjeravanju koji navode proširenu mjernu nesigurnost pri standardnim uvjetima [Tablica 1]. Također, etaloni su podložni nadzoru i dokumentaciji od strane akreditacijskog tijela. Pri izračunavanju mjerne nesigurnosti korištenih etalona, potrebno je uzeti u obzir sve relevantne veličine unutarnjih i vanjskih utjecaja. U slučaju da se umjeravanje ne provodi pri standardnim uvjetima, primjenjuju se potrebne korekcije tlaka. Mjerne nesigurnosti koje se pripisuju spomenutim korekcijama trebaju se uzeti u obzir kao daljni doprinos u ukupnom proračunu.

**Tablica 1 – Intervali ponovnog umjeravanja (preporuka) [12]**

<b>Tlačne vage</b>	5 godina
<b>Bourdonove cijevi, klasa &gt; 0,6</b>	2 godine
<b>Električna mjerila tlaka, &gt; 0,5 % mjernog područja</b>	2 godine
<b>Pretvornici tlaka s električnim izlazom, &gt; 0,5 % mjernog područja</b>	2 godine
<b>Bourdonove cijevi, klasa ≤ 0,6</b>	1 godina
<b>Električna mjerila tlaka, ≤ 0,5 % mjernog područja</b>	1 godina
<b>Pretvornici tlaka s električnim izlazom, ≤ 0,5 % mjernog područja</b>	1 godina

Bez obzira na preporučena razdoblja, mjerilo se mora ponovno umjeriti u sljedećim slučajevima:

- ukoliko je bilo podvrgnuto predopterećenju izvan dopuštenih granica
- nakon popravka
- nakon nepravilnog rukovanja koje može utjecati na vrijednost mjerne nesigurnosti ili drugih neželjenih posljedica

### **3.2.2 Sukladnost umjeravanja**

Prije provođenja umjeravanja potrebno je vidjeti jesu li zadovoljeni tehnološki uvjeti i specifikacije od strane proizvođača za objekt umjeravanja, tj. treba osigurati sukladnost.

Vanjska inspekcija obuhvaća [12]:

- vizualnu inspekciju za oštećenja
- provjeru moguće kontaminacije
- provjeru znakovlja
- provjeru tehničke dokumentacije za postupak umjeravanja

Funkcionalna ispitivanja [12]:

- ispravnost brtvi u sustavu
- električna operabilnost
- rad upravljačkih elemenata

### **3.2.3 Uvjeti okoliša**

Umjeravanje se provodi nakon uspostavljanja temperaturne ravnoteže između objekta umjeravanja i okoline unutar dopuštenog temperaturnog područja (18 – 20°C). Poželjno je da varijacije temperature prilikom umjeravanja ne budu veće od 1°C. Prilikom korištenja tlačnih vaga moguć je značajan utjecaj gustoće zraka na rezultat umjeravanja, stoga se moraju uzeti u obzir vrijednosti atmosferskog tlaka i relativne vlažnosti zraka. Podatak o tome je potrebno navesti i u potvrdi o umjeravanju.

### 3.2.4 Metode umjeravanja

Prilikom umjeravanja potrebno je obratiti pozornost na sljedeće [12]:

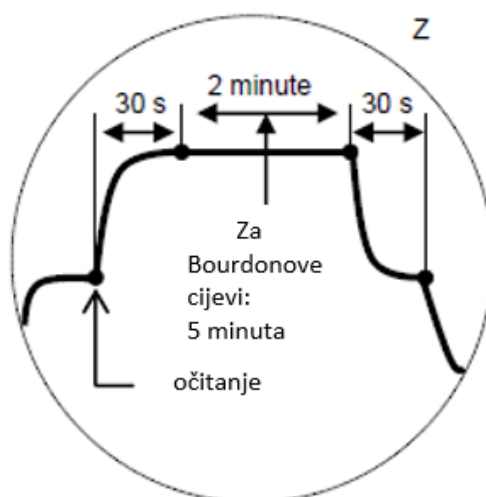
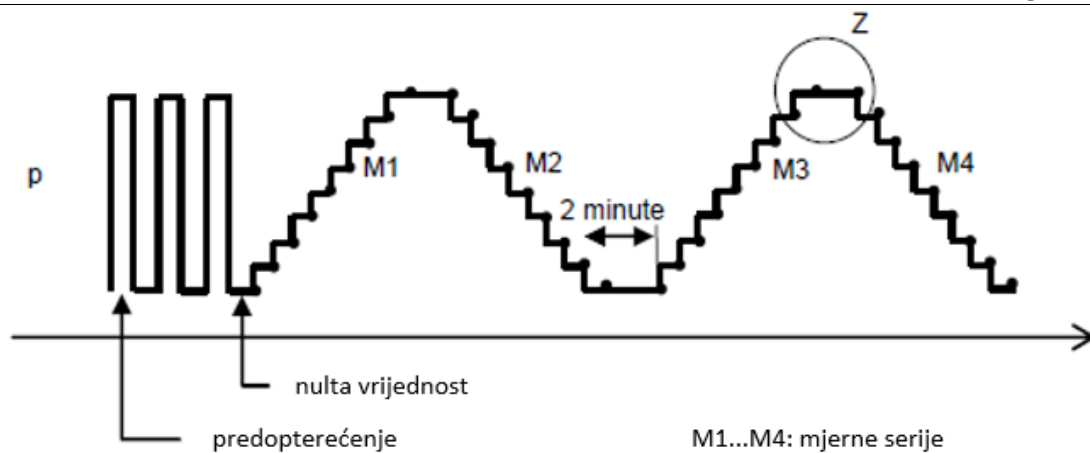
- mjerilo tlaka mora bit umjereno kao cjelina
- treba razmotriti potreban položaj ugradnje
- umjeravanje se provodi pri jednako raspoređenim mjernim točkama u rasponu umjeravanja
- broj mjernih serija varira ovisno o željenoj mjernoj nesigurnosti
- uvjete prilikom montaže mjernog instrumenta
- razliku visine između etalona i umjeravanog mjerila držati što manjom ili primjeniti potrebnu korekciju

Usporedba izmjerene vrijednosti umjeravanog mjerila i referentnog etalona ostvariva je na način da se tlak prilagodi indikaciji jednom od dotičnih instrumenata. Vrijeme između dva predopterećenja treba iznositi minimalno 30 sekundi. Nakon predopterećenja i postizanja stacionarnih uvjeta, indikacija umjeravanog mjerila podešena je na nulu te se odmah očitava prva mjerna točka. Korak između dva uzastopna opterećenja tlaka treba biti konstantan i ne kraći od 30 sekundi, a očitavanje vrijednosti tlaka se treba vršiti najmanje 30 sekundi nakon promjene tlaka. Najveću vrijednost mjernog područja se očitava dva puta jer mjerna točka predstavlja kraj uzlazne serije i početak silazne serije.

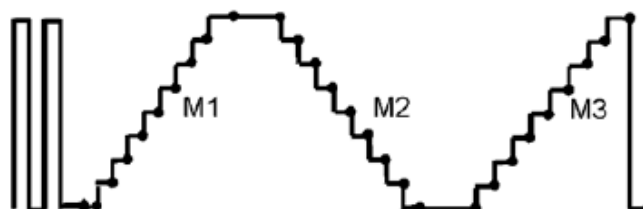
Općenito postoje tri metode umjeravanja mjerila tlaka, a koje su opisane u tablici 2, a detaljnije prikazane na slikama 13, 14 i 15.

**Tablica 2 – Metode umjeravanja [12]**

Tip umjeravanja	Željena mjerna nesigurnost (% mjernog područja)	Minimalni broj mjernih točaka (s nulom uzlazno/silazno)	Broj predopterećenja	Promjena opterećenja +vrijeme čekanja (sekunde)	Vrijeme zastoja u najvećoj točki mjernog područja (minute)	Broj mjernih serija	
						uzlazno	silazno
A	< 0,1	9	3	> 30	2	2	2
B	0,1 - 0,6	9	2	> 30	2	2	1
C	> 0,6	5	1	> 30	2	1	1

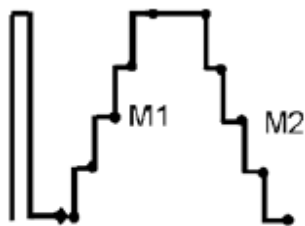


Slika 13 – Tip A [12]



Slika 14 – Tip B [12]





Slika 15 – Tip C [12]

Iz priloženog je vidljiv princip umjeravanja. U svakom se tipu umjeravanja mjerilo opteretiti do maksimalnog opterećenja, a potom rastereti na nulu, a ovisno o tipu se postupak po potrebi ponovi. Zatim slijedi umjeravanje po određenim točkama umjeravanja uzlaznim i silaznim putem, pazeći da se početne i konačne točke serija mjere dva puta u razmaku od 2 minute.

### 3.2.5 Model mjerne nesigurnosti

Određivanje mjerne nesigurnosti općenito se izračunava prema proceduri opisanoj u DAkkS-DKD-3 (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) – Njemačkom akreditacijskom tijelu.

Jednadžba (7) predstavlja doprinos standardne nesigurnosti  $u(x_i)$  ulazne veličine  $x_i$ , standardnoj nesigurnosti izlazne veličine  $y$ :

$$u_i(y) = c_i * u(x_i) \quad (7)$$

gdje je

$c_i$  – koeficijent osjetljivosti

Ukupna standardna nesigurnost izlazne veličine  $y$  je:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (8)$$

Izraz za proširenu mjernu nesigurnost glasi:

$$U(y) = k * u(y) \quad (9)$$

gdje je:

$k$  – faktor pokrivanja koji iznosi 2 tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%

Procjene mjerne nesigurnosti pripisane ulaznim veličinama dijele se u dvije kategorije – Tip A i Tip B. Procjene tipa A su procjene koje koriste statistiku (obično iz više puta ponovljenih mjerenja) [5].

Procjene tipa B su procjene bazirane na drugim informacijama. To može biti: prethodno iskustvo, iz vanjskih umjernica, iz proizvođačkih specifikacija, iz proračuna, iz objavljenih izvora (članak, knjiga) i iz zdravog razuma [5]. U mnogim slučajevima, može se navesti samo gornja i donja granica ( $a_+$  i  $a_-$ ) za vrijednost ulazne veličine, pri čemu se sve vrijednosti unutar granica mogu smatrati jednako vjerojatnim. Takvu situaciju najbolje opisuje pravokutna razdioba podataka. Pomoću jednadžbe (10) dobiva se procjena ulazne veličine (11) i pripisane standardne nesigurnosti (12).

$$a_+ - a_- = 2a \quad (10)$$

$$x_i = \frac{1}{2} * (a_+ + a_-) \quad (11)$$

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

Ako je vjerojatnije da se vrijednosti nalaze u sredini ili na rubu intervala, onda se stanje opisuje s trokutastom razdiobom podataka (13) ili razdiobom funkcije U-oblika (14).

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (13)$$

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

U nastavku je prikazan primjer proračuna ukupne mjerne nesigurnosti za neki mjerni instrument. Jednadžba (15) prikazuje mjerno odstupanje očitavanja instrumenta; posebno za izmjerene vrijednosti u smjeru porasta tlaka, a posebno u smjeru pada tlaka.

$$\Delta p_{\text{uzlazno/silazno}} = p_{\text{očit,uzlazno/silazno}} - p_{\text{etalon}} + \sum_{i=1}^N \delta p_i \quad (15)$$

Član  $\sum_{i=1}^N \delta p_i$  predstavlja relevantne parametre koji utječu na analizu nesigurnosti mjera: Rezolucija  $r$ , nulto odstupanje  $f_0$ , ponovljivost  $b'$ , obnovljivost  $b$  i histereza  $h$ .

Kod analognog prikaza, *rezolucija*  $r$  definirana je podjelom skale uređaja, dok kod digitalnog prikaza odgovara digitalnom koraku tj. broju decimala, pod uvjetom da očitavanje ne varira za više od jednog koraka prilikom neopterećenosti mjernog instrumenta.

*Odstupanje od nultočke*  $f_0$  (neopterećeno mjerilo na atmosferskom tlaku) može se postaviti prije svake uzlazne, odnosno silazne serije mjerenja te se mora očitati prije i poslije svake serije mjerenja. Očitavanje se provodi u stanju neopterećenja. Određivanje odstupanja od nultočke izostavlja se u slučaju apsolutnih mjera tlaka, prilikom čega nulta točka nije uključena u područje umjeravanja (npr. barometri). Izračunava se prema:

$$f_0 = \max\{|x_{2,0} - x_{1,0}|, |x_{4,0} - x_{3,0}|\} \quad (16)$$

Indeksi označavaju izmjerene vrijednosti na nultim točkama mjernih serija M1 do M4 (npr. Slika 13)

*Ponovljivost*  $b'$  je maksimalna razlika izlaznih vrijednosti za neku mjernu točku mjerenu pri identičnim uvjetima. Identični uvjeti uključuju: jednakost metode mjerenja, jednaki promatrač, jednako podešen mjerni instrument, jednaka lokacija te ponavljanje u kratkom vremenskom periodu [13]. To je zapravo mjera preciznosti.

$$b'_{uzlazno,j} = |(x_{3,j} - x_{3,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})| \quad (17)$$

$$b'_{silazno,j} = |(x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{2,j} - x_{1,0})| \quad (18)$$

$$b'_{prosjeck,j} = \max\{b'_{uzlazno,j}, b'_{silazno,j}\} \quad (19)$$

gdje prvi indeks označuje mjernu seriju, a drugi mjernu točku.

*Obnovljivost*  $b$  definira razliku izlaznih vrijednosti za neku mjernu točku pri različitim mjernim uvjetima. Može se reći da je indikacija sposobnosti ponavljanja tuđih mjerenja [13].

$$b_{uzlazno,j} = |(x_{3,j} - x_{3,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})| \quad (20)$$

$$b_{silazno,j} = |(x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{2,j} - x_{1,0})| \quad (21)$$

$$b_{prosjeck,j} = \max\{b_{uzlazno,j}, b_{silazno,j}\} \quad (22)$$

gdje prvi indeks označava mjernu seriju, a drugi mjernu točku.

*Histereza*  $h$  je maksimalna razlika u izlaznoj veličini neke mjerne točke pri približavanju točki sa strane povećanja i strane pada tlaka (uzlazno/silazno).

$$h_{prosjeck,j} = \frac{1}{n} \{ |(x_{2,j} - x_{1,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})| + |(x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{3,j} - x_{3,0})| \} \quad (23)$$

Varijabla  $n$  predstavlja broj mjernih serija.

Konačno, izraz za mjernu nesigurnost glasi:

$$u_{uzlazno/silazno} = \sqrt{u_{etalon}^2 + u_r^2 + u_{f_0}^2 + u_{b'}^2 + u_b^2 + u_h^2} \quad (24)$$

Dok proširena mjerna nesigurnost iznosi:

$$U_{uzlazno/silazno} = k * u_{uzlazno/silazno} \quad (25)$$

### 3.3 EURAMET

EURAMET je regionalna mjeriteljska organizacija (RMO) u Europi koja se bavi usklađivanjem suradnje nacionalnih mjeriteljskih instituta (NMI) na područjima kao što su metrologija, sljedivost mjerenja u SI jedinicama, međunarodno priznavanje nacionalnih mjernih standarda i pripadajuće sposobnosti umjeravanja i mjerenja. Zadatak EURAMET-a je razviti i raširiti integriranu, ekonomičnu te međunarodno konkurentnu mjeriteljsku infrastrukturu za Europu, pritom uzimajući u obzir potrebe industrije i poslovanja država [14]. Jedan od najviših prioriteta EURAMET-a je promicanje i unapređenje uloge metrologije u modernom društvu. Dva glavna sredstva za ostvarivanje spomenutih ciljeva su Europski program mjeriteljstva (EMRP) i Europski mjeriteljski program za inovacije i istraživanja (EMPIR) s više od 100 zajedničkih projekata do sada.

#### 3.3.1 Upute za umjeravanje tlačnih vaga

EURAMET-ov dokument [15] o umjeravanju tlačnih vaga je sastavljen u svrhu poboljšanja istovrijednosti i uzajamnog priznavanja rezultata umjeravanja dobivenih u različitim laboratorijima. Publikacija daje smjernice o praksi mjerenja u pojedinim područjima mjerenja. Primjenom dotičnih smjernica u različitim laboratorijima, osigurava se međusobna prihvaćenost rezultata umjeravanja diljem Europe. Pristupi koji se preporučuju nisu obvezavajući i više služe kao sredstvo promicanja dosljednog pristupa praksi mjerenja. Smjernica opisuje metode umjeravanja tlačnih vaga uključujući i primjer procjene mjerne nesigurnosti.

Relevantne vrste tlačnih vaga pokrivaju sljedeće raspone:

- 1,5 kPa do 7 MPa za apsolutni tlak i 1,5 kPa do 100MPa za manometarski tlak kod plinskih tlačnih vaga.
- 0,1 MPa do 500 MPa za manometarski tlak kod uljnih tlačnih vaga.

Tlačne vage se mogu koristiti za umjeravanje bilo kojeg mjernog instrumenta te se također primjenjuju za umjeravanje drugih tlačnih vaga. Umjeravanje treba provoditi u onom trenutku kada je tlačna vaga u dobrom radnom stanju.

Sljedeći parametri se trebaju kontrolirati prilikom umjeravanja, a detaljnije su objašnjeni u nastavku:

- Radni prostor gdje se provodi umjeravanje
- Montaža uređaja
- Oprema za održavanje tlaka
- Radno stanje etalona
- Radno stanje mjernog uređaja

Temperatura okoline mora bit između  $15^{\circ}\text{C}$  i  $25^{\circ}\text{C}$ , s maksimalnim varijacijama od  $2^{\circ}\text{C}$ . Za manju nesigurnost (tipično 0,01%), trebala bi se mjeriti temperatura sklopa klip/cilindar. Postoji ograničenje na otvaranje i zatvaranje vrata i kretanje osoblja u mjernom prostoru u svrhu održavanja stabilne atmosfere te je neophodno održavanje ventilacije na način da ne postoje jake struje zraka u blizini tlačne vage, tj. montaža uređaja treba biti što je dalje moguće od klima jedinica, difuzora, rešetki i slično.

Potrebno je osigurati relativnu blizinu etalona i umjeravanog instrumenta, te što je više moguće smanjiti visinsku razliku između istih. Obično je referentni etalon za umjeravanje tlačne vage druga tlačna vaga. Za raspone tlakova ispod 300 kPa, etalon može bit tekućinski manometar, no moguće je koristit i druge instrumente ako se radi o specifičnim slučajevima. Općenito, referentni instrument mora se moći pratiti na nacionalnoj razini s priznatim certifikatom umjeravanja. Osim toga, mora imati manju mjernu nesigurnost od pretpostavljene mjerne nesigurnosti instrumenta koji se umjerava.

Za održavanje tlaka u slučaju apsolutne uljne tlačne vage treba koristiti čistu pumpu, ili prilikom primjene mehaničkih rotacionih pumpi koristiti odgovarajuću zamku. Također, potrebna je primjena vakuum pumpe u svrhu smanjivanja preostalog tlaka preko sklopa klipa/mase utega tj. održavanje tlaka ispod 10 Pa ili  $10^{-5}$  preostalog tlaka.

Tlačna vaga mora bit postavljena u laboratoriju najmanje 12 sati prije samog umjeravanja zbog postizanja toplinske ravnoteže. Nadalje, potrebna je provjera ulja zbog mogućih nečistoća i eventualna zamjena te inspekcija sklopa klip/cilindar na ogrebotine ili koroziju. Kod apsolutnih tlačnih vaga pumpa treba raditi 30 minuta na početku umjeravanja zbog uklanjanja vodene pare ispod zvona.

### **3.3.2 Upute za umjeravanje elektromehaničkih manometara**

EURAMET-ov dokument [16] obuhvaća tri vrste elektromehaničkih manometara: pretvornici tlaka, transmiteri tlaka te manometri s digitalnim ili analognim pokazivanjem. Upute se primjenjuju za sve elektromehaničke manometre za mjerenje apsolutnog, manometarskog ili diferencijalnog tlaka uključujući i vakuumske uređaje za mjerenje tlaka ispod 1 kPa. Postupak umjeravanja obuhvaća instalaciju opreme i sredstva koja treba upotrebljavati te izbor metode umjeravanja. Izbor metode umjeravanja ovisi o zahtjevu korisnika, tj. o očekivanoj točnosti mjerila.

Navedene su tri metode umjeravanja:

- osnovna metoda
- normirana metoda
- opsežna metoda

Osnovna metoda umjeravanja upotrebljava se za mjerila kod koje je očekivana povećana mjerna nesigurnost ( $k=2$ ) veća od 0,2% ukupne mjerne skale. Umjeravanje se provodi jednom u šest mjernih točaka pri rastućim i padajućim tlakovima. Ponovljivost se procjenjuje iz tri ponovljena mjerenja jedne mjerne točke (preferirano na 50% mjerne skale).

Normirana metoda umjeravanja se primjenjuje za mjerila kod kojih je očekivana povećana mjerna nesigurnosti između 0,05% i 0,2% ukupne mjerne skale. Provodi se jednom u jedanaest mjernih točaka pri rastućim i padajućim tlakovima. Ponovljivost se procjenjuje iz tri ponovljena mjerenja u četiri mjerne točke (preferirano na 0, 20, 50 i 80% mjerne skale).

Opsežna metoda ima primjenu kod mjerila kod kojih je očekivana povećana mjerna nesigurnost manja od 0,05% ukupne mjerne skale. Umjeravanje se provodi za jedanaest mjernih točaka u tri mjerne serije.

Prije početka samog umjeravanja potrebno je uključiti opremu kako bi se postigla ravnoteža cijelog sustava. Mjerni instrument koji se umjerava treba očistiti, provjeriti stanje električnih kontakata i postaviti što je bliže moguće referentnom etalonu, kao i po mogućnosti smanjiti

razliku između referentnih razina tlaka obaju mjerila. Ukoliko odstupanja postoje, potrebno je izračunat korekcije i nesigurnosti. Neovisno o mjerilu koje se umjerava te odabranoj metodi umjeravanja, postupak se provodi u tri uzastopna koraka:

- provjera ograničenog broja točaka mjernog raspona za određivanje početnog metrološkog stanja instrumenta
- podešavanje mjerila sukladno specifikacijama proizvođača
- odgovarajuće umjeravanje mjerila po cijelom mjernom području



## 4. MEĐULABORATORIJSKE USPOREDBE

Najprikladnije sredstvo za praćenje kvalitete rezultata tijela za ocjenjivanje sukladnosti jest njihovo uključivanje u programe ispitivanja sposobnosti ili vanjske procjene kvalitete, ili sudjelovanje u drugim međulaboratorijskim usporedbama. Međulaboratorijska usporedba je organizacija, izvedba i vrednovanje mjerenja ili ispitivanja istih ili sličnih predmeta ispitivanja u dva ili više laboratorija prema unaprijed određenim uvjetima [17]. Primjene međulaboratorijskih usporedbi u svrhu ispitivanja sposobnosti obuhvaćaju:

- ocjenjivanje izvedbi sudionika za određena mjerenja ili ispitivanja
- otkrivanje mogućih problema u radu, kao i pokretanje odgovarajućih popravnih radnji
- utvrđivanje efikasnosti ispitnih ili mjernih metoda
- osiguranje povjerenja kupcima usluga
- usporedba metodologije i postupaka različitih laboratorija
- izobrazba sudionika temeljena na rezultatima provedenih usporedbi
- potvrđivanje granica nesigurnosti

Osim toga, postoje i druge primjene međulaboratorijskih usporedbi koje se ne temelje na ispitivanju sposobnosti sudionika, već na vrednovanju značajki izvedba, ocjenjivanju referentnih materijala ili izjavama ekvivalentnosti.

### 4.1 Upute EURAMET-a

Upute EURAMET-a o međulaboratorijskim usporedbama [18] uvijek se trebaju koristiti u kombinaciji s dokumentom *'Measurement comparisons in the CIPM MRA'* [19]. Pravila navedena u [19] primjenjuju se za sve ključne i dopunske usporedbe u EURAMET-u, te se primjenjuju i tzv. za pilot-istraživanja. Ključne usporedbe odabire savjetodavni odbor u svrhu testiranja glavnih tehnika i metoda u praksi. Osim toga, mogu se organizirati sljedive bilateralne usporedbe s pilot-laboratorijem ili s jednim od sudionika. Takve bilateralne usporedbe može zatražiti institut koji smatra rezultate ključnih usporedbi nerazmjernim njegovim standardima. Sljedive bilateralne usporedbe smatraju se novom i različitom usporedbom. Treba napomenuti da bilateralne usporedbe uzrokuju dodatni angažman u organizaciji i povezivanju rezultata s ključnom usporedbom. Ako je to moguće, poželjno je da ih laboratorij izbjegava kad god postoji mogućnost da se pridruži ključnoj ili dopunskoj usporedbi. Dopunske usporedbe služe za zadovoljavanje specifičnih potreba koje nisu obuhvaćene ključnim usporedbama. Posebice

uključuju laboratorije koji ne ispunjavaju uvjete za sudjelovanje u ključnim usporedbama. Pilot-istraživanjima se obično poduzimaju za uspostavljanje povjerenja u mjerenja u nekom novom području, ili sa svrhom obuke. U pripremi usporedbi, uloge i dužnosti trebaju se dodijeliti na način da se osigura učinkovita provedba usporedbe te da među sudionicima postoji pravedna raspodijeljenost rada. Prilikom dogovaranja međulaboratorijske usporedbe, jednom od sudionika mora biti dodijeljena uloga koordinatora, tzv. pilot-laboratorij. Pilot-laboratorij ima glavnu odgovornost za sljedeće:

- navođenje grupe sudionika
- izrađivanje tehničkog protokola u dogovoru sa sudionicima i tehničkim odborom
- pripremu registracije usporedbe za bazu podataka tehničkog odbora EURAMET-a
- organiziranje pripreme prijenosnog etalona i njegove cirkulacije među sudionicima
- uspoređivanje mjernih rezultata sudionika
- konzultiranje s tehničkim odborom u slučaju velikih problema poput značajnih odgoda, oštećenja ili gubitka etalona, itd.
- pripremu godišnjih izvješća o napretku za sastanke s tehničkim odborom
- ocjenjivanje usporedbe
- pripremu konačnih izvješća

## **4.2 Hrvatska akreditacijska agencija (HAA)**

Hrvatska akreditacijska agencija (HAA) je neovisna i neprofitna javna ustanova koja obavlja poslove nacionalne službe za akreditaciju u Republici Hrvatskoj. Osnovana je Uredbom Vlade Republike Hrvatske, na temelju Zakona o akreditaciji (NNbr. 158/03) radi provedbe hrvatskog tehničkog zakonodavstva koje je usklađeno s pravnom stečevinom Europske unije [20].

### **4.2.1 Politika HAA**

Da bi neki laboratorij dobio akreditaciju, mora dokazati svoju tehničku osposobljenost. Tehnička osposobljenost laboratorija dokazuje se unutrašnjim i vanjskim mjerama kontrole kvalitete rezultata. Uspješno sudjelovanje u shemama ispitivanja sposobnosti ili vanjske procjene kvalitete je najbolji način dokazivanja tehničke osposobljenosti nekog laboratorija. Neke od ostalih mjera dokazivanja tehničke osposobljenosti su:

- međulaboratorijske usporedbe za određivanje karakteristika referentnog materijala, za usporedbu rezultata dvaju ili više laboratorija na njihovu vlastitu inicijativu, te za procjenu karakteristika izvedbi metode
- mjeriteljska revizija
- ponavljanje ispitivanja ili umjeravanja identičnim metodama
- ponavljanje ispitivanja ili umjeravanja različitim metodama
- usporedba analiza provedenih neovisnim tehnikama
- primjena kontrolnih karata

U slučajevima gdje međulaboratorijske usporedbe nisu moguće ili nisu dovoljne za dokazivanje tehničke osposobljenosti, laboratorij mora primijeniti druge mjere kontrole kvalitete kojima će u potpunosti dokazati svoju tehničku osposobljenost [17]. Ukoliko se pojavi situacija gdje postoje neispravni rezultati sudjelovanja, laboratorij mora poduzeti određene mjere kako bi istražio i uklonio uzrok problema. Također, laboratorij mora jedanput godišnje davati izvješća Hrvatskoj akreditacijskoj agenciji vezanih o sudjelovanjima u međulaboratorijskim usporedbama, kao i o slučajevima gdje se pojavljuju neispravni rezultati sudjelovanja. Ukoliko se pojavi sumnja u ispravnost rezultata tijekom međulaboratorijske usporedbe, moguća je suspenzija akreditacije od strane HAA.

#### **4.2.2 Pravila HAA**

Laboratorij mora imat kvalitetnu dokumentaciju vezanu za politiku i postupke osiguranja kvalitete rezultata. Nadalje, detaljno mora bit razrađena strategija rada kod kontrole kvalitete, te mora postojat plan sudjelovanja u ispitivanjima sposobnosti. Preporuka HAA je izrada godišnjih planova kontrole kvalitete. Za svako ispitivanje sposobnosti ili provedenu mjeru kontrole kvalitete, potrebno je napraviti analizu odgovarajućih rezultata. Analiza rezultata mora bit detaljno razrađena i pokrivati informacije o mjernoj opremi, postupcima mjerenja, shemama ispitivanja, izvođačima samih mjerenja, kriterije vrednovanja, itd. Sva ispitivanja sposobnosti ili međulaboratorijske usporedbe koje HAA prihvaća za dokazivanje tehničke osposobljenosti laboratorija moraju biti provedeni u skladu s načelima norme HRN EN ISO/IEC 17043 [17]. HAA je u mogućnosti propisati nekom laboratoriju obavezno sudjelovanje u nekom krugu ispitivanja sposobnosti, ukoliko obrazloži svoju odluku. Odbijanje sudjelovanja može rezultirati

suspencijom akreditacije. Osim toga, postoje zakonski propisana ispitivanja sposobnosti ili druge međulaboratorijske usporedbe u kojima su laboratoriji dužni sudjelovati.

Prilikom ocjenjivanja na licu mjesta, laboratorij mora pružiti sve dokaze o svojim sudjelovanjima u međulaboratorijskim usporedbama, a koja se tiču njegovog područja akreditacije [17]. Shema ispitivanja sposobnosti obično definira kriterije prihvatljivosti, a temelje se na graničnim vrijednostima koje su unaprijed dogovorene ili pokazateljima koji se temelje na statističkom proračunu. Kriteriji prihvatljivosti za pojedinačne rezultate koji za obradu uspješnosti sudjelovanja koriste statističko određivanje rezultata primjenom  $z$ -vrijednosti,  $z'$ -vrijednosti,  $\zeta$ -vrijednosti i  $E_n$  vrijednosti su sljedeći [17]:

$ z  \leq 2$	zadovoljavajuće
$2 <  z  < 3$	upitno
$ z  \geq 3$	nezadovoljavajuće
$ E_n  \leq 1$	zadovoljavajuće
$ E_n  > 1$	nezadovoljavajuće

Kriteriji za  $z'$  i  $\zeta$  istovjetni su onima za  $z$ -vrijednosti. U slučaju da kriteriji nisu zadovoljeni ili su upitni, laboratorij mora provesti istraživanje uzorka koji su doveli do takvog rezultata te pokrenuti odgovarajuće popravne radnje koje je onda potrebno i dokumentirati jer su podložne ocjenjivanju od strane Hrvatskog akreditacijskog tijela. Tablica 3 prikazuje uobičajene statistike za kvantitativne rezultate.

Tablica 3 – Uobičajene statistike za kvantitativne rezultate [17]

<b>razlika</b>	$D$	$D = (x - X)$	$x$ – rezultat sudionika
<b>postotna razlika</b>	$D_{\%}$	$D_{\%} = \frac{(x - X)}{X} * 100$	$X$ – dodijeljena vrijednost
<b><math>z</math> vrijednost</b>	$z$	$z = \frac{(x - X)}{\sigma}$	$\sigma$ – standardno odstupanje ocjenjivanja sposobnosti
<b><math>z'</math> vrijednost</b>	$z'$	$z' = \frac{(x - X)}{\sqrt{\sigma^2 + u_X^2}}$	$u_X$ – mjerna nesigurnost dodijeljene vrijednosti
<b><math>\zeta</math> vrijednost</b>	$\zeta$	$\zeta = \frac{(x - X)}{\sqrt{u_x^2 + u_X^2}}$	$u_x$ – procjena mjerne nesigurnosti sudionikovog rezultata $x$
<b><math>E_n</math> broj</b>	$E_n$	$E_n = \frac{(x - X)}{\sqrt{U_x^2 + U_X^2}}$	$U_X$ – proširena mjerna nesigurnost dodijeljene vrijednosti $X$ (utvrđena u referentnom laboratoriju) $U_x$ – proširena mjerna nesigurnost sudionikovog rezultata $x$
<b><math>E_z</math> vrijednost</b>	$E_z$	$E_{z-} = \frac{x - (X - U_X)}{U_X}$ $E_{z+} = \frac{x - (X + U_X)}{U_X}$	

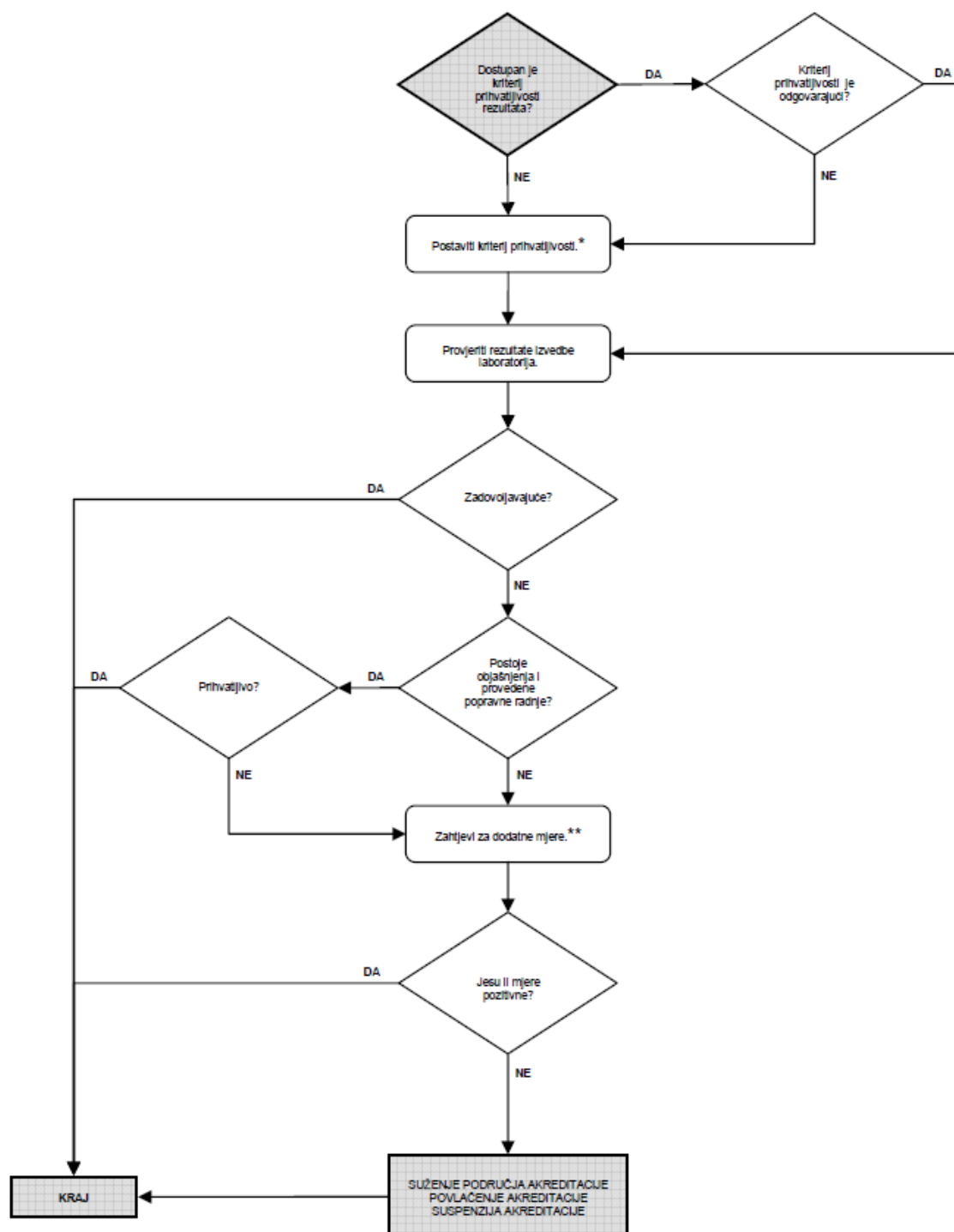
Kod kvalitativnih podataka obično se uspoređuje rezultat sudionika s dodijeljenom vrijednosti, pri čemu statistička metoda obrada podataka nije primjenjiva, a niti vrednovanje kao kod kvantitativnih rezultata [17].

Ocjenjivatelji mogu zatražiti ponovno ili dodatno sudjelovanje u novim shemama ispitivanja sposobnosti u nekim posebnim slučajevima:

- u svrhu potvrde određenih rezultata
- kad postoje indikacije da se dešavaju kontinuirani problemi u radu laboratorija
- kad u krugovima ispitivanja sposobnosti postoji učestalost sudjelovanja od strane jedne osobe ili osoblja

- kad su popravne radnje neučinkovite
- kad postoji sumnja u ispravnost postupka

Na slici 16 prikazan je dijagram tijeka ocjenjivanja sheme ispitivanja sposobnosti.



Slika 16 – Dijagram tijeka ocjenjivanja sheme ispitivanja sposobnosti [17]

\* Primjer kriterija: > 80% ispitanih parametara unutar 3  $\sigma$ -vrijednosti

\*\* Mjere mogu biti:

- ponoviti ispitivanja sposobnosti
- provjeriti unutrašnjim mjerama kontrole kvalitete
- zatražiti detaljniji izvještaj o provedenim popravnih radnjama
- provesti nadzor na licu mjesta

#### **4.2.3 Pregled normi za akreditaciju**

*HRN EN ISO/IEC 17011:2005*, Ocjena sukladnosti – Opći zahtjevi za akreditacijska tijela koja akreditiraju tijela za ocjenu sukladnosti

*HRN EN ISO/IEC 17025:2007*, Opći zahtjevi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija

*HRN EN ISO 15189:2012*, Medicinski laboratoriji – Zahtjevi za kvalitetu i osposobljenost

*HRN EN ISO/IEC 17020:2012*, Ocjenjivanje sukladnosti – Zahtjevi za rad različitih vrsta tijela koja provode inspekciju

*HRN EN ISO/IEC 17043:2010*, Ocjenjivanje sukladnosti – Opći zahtjevi za ispitivanje sposobnosti

*HRN EN ISO 13528:2012*, Statističke metode pri ispitivanju sposobnosti putem međulaboratorijskih usporedbi

## 5. OPIS PROVEDENIH MJERENJA I ANALIZA REZULTATA

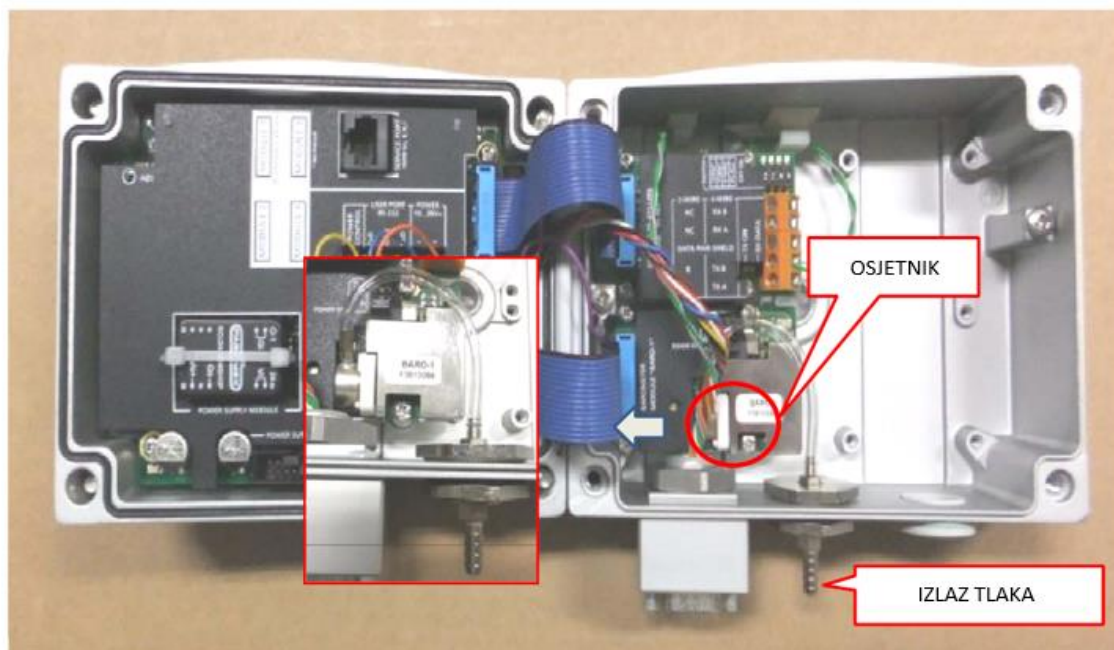
Mjerenja su provedena u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (LPM), te u umjernom laboratoriju Državnog hidrometeorološkog zavoda (SOUL – Samostalni odjel za umjerni laboratorij).

Međulaboratorijska usporedba obuhvaća mjerno područje od 500 do 1100 hPa (više od zadanih 800 do 1100 hPa zbog boljih mogućnosti mjernog instrumenta). Svrha usporedbe je bila odrediti preciznost metoda mjerenja apsolutnog tlaka i procijeniti sposobnost sudioničkih laboratorija za obavljanje određene metode mjerenja. Referentni laboratorij je LPM, a objekt umjeravanja je bio digitalni barometar proizvođača Vaisala koji je prikazan na slikama 17 i 18.



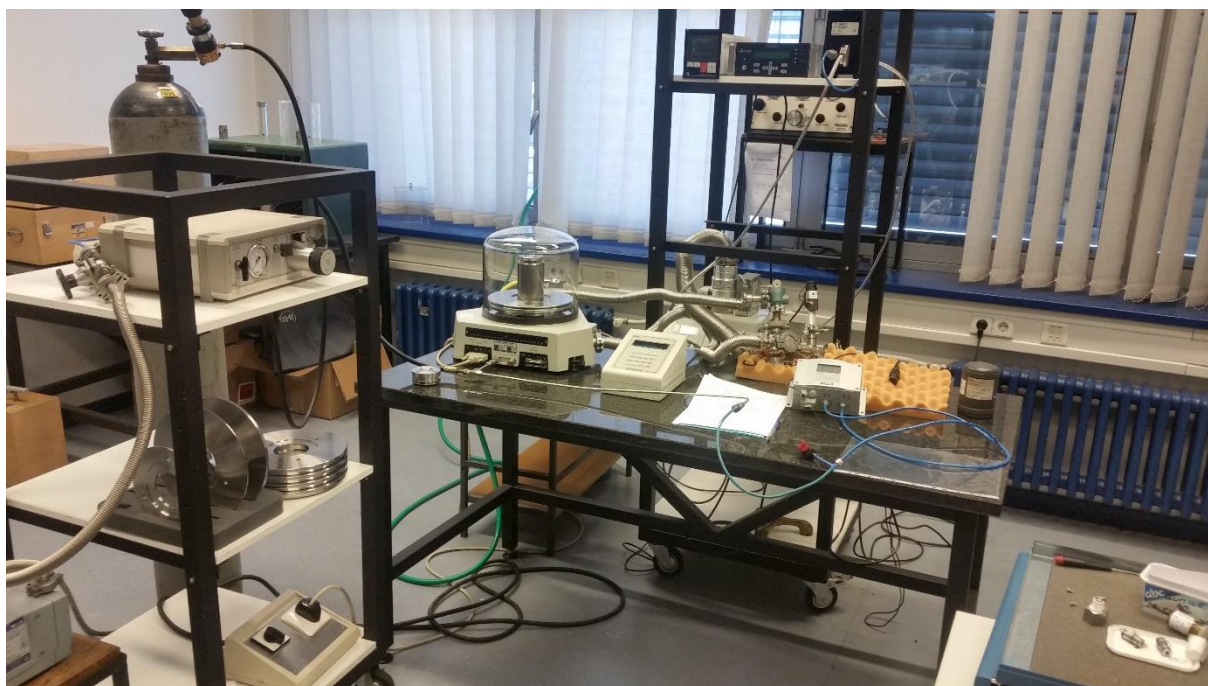
Slika 17 – PTB330, Vaisala (pogled izvana)



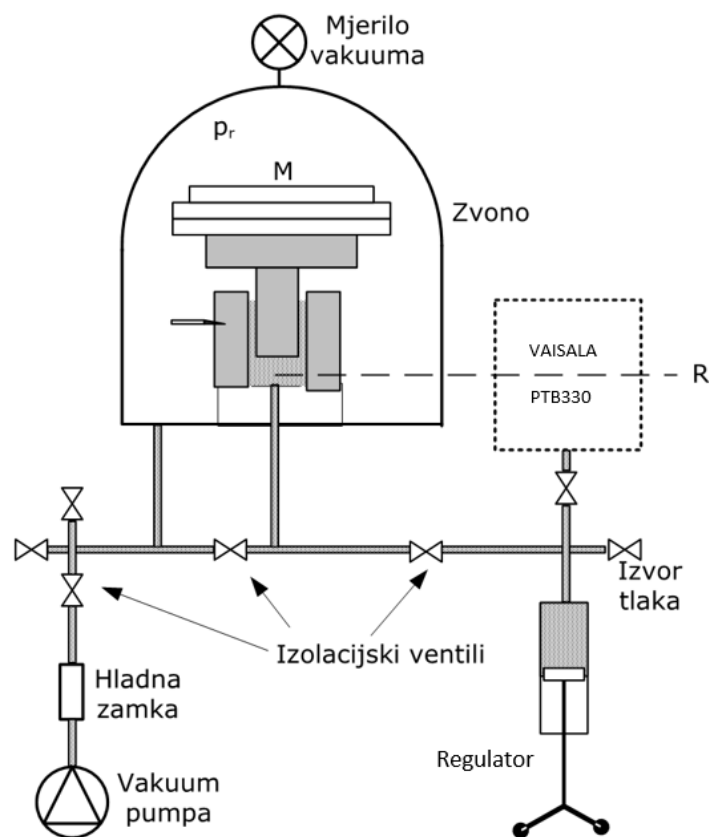


**Slika 18 – PTB330, Vaisala (pogled iznutra)**

Mjerenja u oba laboratorija provedena su prema tipu B umjeravanja navedenom u tablici 2 u poglavlju 3.2.4, u jedanaest točaka. Na slikama 19 i 20 prikazana je mjerna linija u LPM-u.



**Slika 19 – Mjerna linija za umjeravanje u LPM-u**



Slika 20 – Shematski prikaz mjerne linije u LPM-u [21]

Mjerna linija se sastoji od etalona, izolacijskih ventila, vakuum pumpe i hladne zamke, izvora tlaka, regulatora te umjernog uređaja. Svrha vakuumske pumpe je dobivanje vakuuma ispod zvona, dok hladna zamka služi za njezinu zaštitu. Za obavljanje finih mjerenja tlaka koristi se regulator promjenjivog volumena. Slovo R označuje referentnu visinu etalona i umjernog uređaja te je poželjno da njihova razlika bude što je moguće manja. Etalon LPM-a je tlačna vaga proizvođača Fluke koja je prikazana na slici 21.



**Slika 21 – Tlačna vaga PG7601, Fluke Calibration**

Na slikama 22 i 23 prikazana je potvrda o umjeravanju LPM-a, a na slikama 24, 25 i 26 izgled potvrde iz umjernog laboratorija DHMZ-a. Potvrde sadrže pregled umjernog postupka te pripadajuće rezultate umjeravanja. Umjeravanje se provodilo za oba izlaza barometra, tj. očitavanja za P1 i P2. Rezultati se mogu povezati s usporedbom iz [22].



Strana 2 od 2 Potvrde o umjeravanju

P1

**1.Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka:**

Vrsta mjerila: Digitalno mjerilo tlaka aps.  
 Mjerno područje: 500 do 1100 mbar aps  
 Razred točnosti: %  
 Dopušteno odstupanje: (-)  
 Podjela skale (električni): 0,01 mbar  
 Jedinica tlaka: mbar

**2.Podaci o etalonu:**

Naziv etalona: Tlačna vaga "DHI"  
 Interna oznaka: TLVAG-09  
 Nesigurnost etalona:  $0,5 \times 10^{-4} \times p$   
 Sljedivost: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

**3.Umjerna procedura:**

Instrument je umjeren pomoću etalonskih mjernih sustava Laboratorija za procesna mjerenja.  
 Korištena je interna procedura umjeravanja metodom usporedbe CPTL-02 temeljena na DKD-R6-1 (Tip B) proceduri.

**4.Uvjeti umjeravanja:**

Temperatura okoline: 24 °C Tlačni medij: dušik  
 Tlak okoline: 1000 mbar Pozicija ispitivanog mjerila: vertikalna

**5.Rezultati umjeravanja (Pod gore navedenim uvjetima):**

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona $p_e$ mbar	Pokazivanje mjerila			Srednja vrijednost M mbar	Odstupanje M- $p_e$ mbar	Ponovljivost b mbar	Histereza h mbar	Nesigurnost umjeravanja U mbar
		Uzlazno mbar	Silazno mbar	Uzlazno mbar					
1	510,054	510,46	510,46	510,46	510,46	0,41	0,00	0,00	0,03
2	560,058	560,44	560,44	560,44	560,44	0,38	0,00	0,00	0,03
3	620,062	620,43	620,43	620,43	620,43	0,37	0,00	0,00	0,04
4	680,068	680,41	680,41	680,41	680,41	0,34	0,00	0,00	0,04
5	740,074	740,40	740,40	740,40	740,40	0,33	0,00	0,00	0,04
6	800,079	800,39	800,39	800,39	800,39	0,31	0,00	0,00	0,05
7	860,085	860,38	860,38	860,38	860,38	0,29	0,00	0,00	0,05
8	920,089	920,37	920,37	920,37	920,37	0,28	0,00	0,00	0,05
9	980,094	980,35	980,35	980,35	980,35	0,26	0,00	0,00	0,06
10	1040,100	1040,34	1040,34	1040,34	1040,34	0,24	0,00	0,00	0,06
11	1080,103	1080,32	1080,32	1080,32	1080,32	0,22	0,00	0,00	0,06

**6.Mjerna nesigurnost:**

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ( $k=2$ ), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%.

**7.Označavanje instrumenta:**

Umjerna oznaka naljepljena je na kućište instrumenta.

Slika 22 – Potvrda o umjeravanju, LPM, za tlak P1



Strana 2 od 2 Potvrde o umjeravanju

P2

**1.Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka:**

Vrsta mjerila: Digitalno mjerilo tlaka aps.  
 Mjerno područje: 500 do 1100 mbar aps  
 Razred točnosti: %  
 Dopusšteno odstupanje: (-)  
 Podjela skale (električni): 0,01 mbar  
 Jedinica tlaka: mbar

**2.Podaci o etalonu:**

Naziv etalona: Tlačna vaga "DHI"  
 Interna oznaka: TLVAG-09  
 Nesigurnost etalona:  $0,5 \times 10^{-4} \times p$   
 Slijedivost: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

**3.Umjerana procedura:**

Instrument je umjeren pomoću etalonskih mjernih sustava Laboratorija za procesna mjerenja.  
 Korištena je interna procedura umjeravanja metodom usporedbe CPTL-02 temeljena na DKD-R6-1 (Tip B) proceduri.

**4.Uvjeti umjeravanja:**

Temperatura okoline: 24 °C Tlačni medij: dušik  
 Tlak okoline: 1000 mbar Pozicija ispitivanog mjerila: vertikalna

**5.Rezultati umjeravanja (Pod gore navedenim uvjetima):**

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona $p_e$ mbar	Pokazivanje mjerila			Srednja vrijednost M mbar	Odstupanje M- $p_e$ mbar	Ponovljivost b mbar	Histereza h mbar	Nesigurnost umjeravanja U mbar
		Uzlazno mbar	Silazno mbar	Uzlazno mbar					
1	510,054	510,50	510,50	510,50	510,50	0,45	0,00	0,00	0,03
2	560,058	560,48	560,48	560,48	560,48	0,42	0,00	0,00	0,03
3	620,062	620,47	620,47	620,47	620,47	0,41	0,00	0,00	0,04
4	680,068	680,44	680,44	680,44	680,44	0,37	0,00	0,00	0,04
5	740,074	740,43	740,43	740,43	740,43	0,36	0,00	0,00	0,04
6	800,079	800,41	800,41	800,41	800,41	0,33	0,00	0,00	0,05
7	860,085	860,40	860,40	860,40	860,40	0,31	0,00	0,00	0,05
8	920,089	920,39	920,39	920,39	920,39	0,30	0,00	0,00	0,05
9	980,094	980,38	980,38	980,38	980,38	0,29	0,00	0,00	0,06
10	1040,100	1040,37	1040,37	1040,37	1040,37	0,27	0,00	0,00	0,06
11	1080,103	1080,36	1080,36	1080,36	1080,36	0,26	0,00	0,00	0,06

**6.Mjerna nesigurnost:**



Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ( $k=2$ ), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%.

**7.Označavanje instrumenta:**

Umjerna oznaka naljepljena je na kućište instrumenta.

Slika 23 – Potvrda o umjeravanju, LPM, za tlak P2




 REPUBLIKA HRVATSKA DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD SAMOSTALNA SLUŽBA ZA UMJERNI LABORATORIJ HR-10000 ZAGREB, GRIČ 3 Tel: +385 1 4565 607, Fax: +385 1 4852 036	 DHMZ ROUL	REPUBLIC OF CROATIA METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL SERVICE CALIBRATION LABORATORY HR-10000 ZAGREB, GRIČ 3 Web: meteo.hr, Email: soul@cinus.dhz.hr	Str. 1 Page
--	---	---	----------------

---

## POTVRDA O UMJERAVANJU CERTIFICATE OF CALIBRATION

---

<b>Broj:</b> <i>No.</i>	55/17	17026-HAA 
<b>Predmet umjeravanja:</b> <i>Object of calibration</i>	BAROMETAR, kapacitativni osjetnik Rezolucija: 0,01 hPa	
➤ Naziv proizvođača <i>Manufacturer</i>	VAISALA	
➤ Oznaka vrste <i>Model</i>	PTB 330	
➤ Serijski broj <i>Serial No.</i>	E2040002	
➤ Mjerno područje <i>Measurement range</i>	510 – 1090 hPa	

<b>Kupac:</b> <i>Customer</i>	FSB – LABORATORIJ ZA PROCESNA MJERENJA
➤ Adresa <i>Address</i>	10 000 ZAGREB IVANA LUČIĆA 5
➤ Broj zahtjeva i datum <i>Order No. and date</i>	170026 / 18.01.2017.
➤ Datum prijema predmeta <i>Date of object arrival</i>	18.01.2017



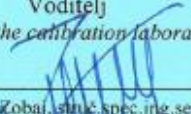
  

<b>Datum umjeravanja:</b> <i>Date of calibration</i>	26.-30.01.2017.
---	-----------------


<b>Ukupan broj stranica:</b> <i>Total page number</i>	3
--	---

 Žig Stamp	Datum Date 31.01.2017.	Mjeritelj Metrology technician  Marinko Marelja, mag.ing.min.	Voditelj Head of the calibration laboratory  Eugen Zobjaj, spec.ing.sec.
---	------------------------------	---	--

Ova POTVRDA O UMJERAVANJU ne smije se preslikavati, osim u cijelosti, bez pismenog odobrenja Samostalne službe za umjereni laboratorij.  
This CERTIFICATE OF CALIBRATION may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the Calibration Laboratory.

Slika 24 – Potvrda o umjeravanju, DHMZ (1/3)

<b>DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD</b>		<b>SAMOSTALNA SLUŽBA ZA UMJERNI LABORATORIJ</b>	Str. 2 Page
--	---	---	----------------

---

**POTVRDA O UMJERAVANJU br. 55/17**  
*Certificate of calibration No.*

---

<b>Postupak umjeravanja:</b> <i>Procedure of calibration</i>	Umjeravanje obavljeno s tlačnom vagom RUSKA, metodom usporedbe prema internom postupku MLQP-5.4.32. Iskazani rezultat predstavlja srednju vrijednost 10 očitavanja.
<b>Mjesto umjeravanja:</b> <i>Place of calibration</i>	<b>DHMZ - SOUL</b> 10 000 Zagreb, Grič 3.
<b>Uvjeti mjerenja:</b> <i>Measurement conditions</i>	Umjeravanje obavljeno kod 11 točaka.
<b>Radni medij:</b> <i>Calibration fluid</i>	Dušik iz plinskog cilindra.
<b>Orijentacija predmeta umjeravanja:</b> <i>Orientation of object of calibration</i>	Okomito / <b>horizontalno</b>
<b>Referentni uređaj:</b> <i>Reference</i>	

Referentni uređaj <i>Reference</i>	Proizvođač <i>Manufacturer</i>	Vrsta <i>Model</i>	Serijski broj <i>Serial No.</i>	Sljedivost <i>Traceability</i>
Tlačna vaga	Ruska	2465A-754A	55825	SA- LK- 012
Kontroler	Ruska	2465A-201A	55653	SA- LK- 012
Vakum senzor	Teledyne	AVC	638	SA- LK- 012

**Sljedivost:**  
*Traceability*

Etaloni su umjereni u akreditiranim laboratorijima čije oznake su prikazane u gornjoj tablici.

Mjerenja su obavljena pomoću standarda za koje je sljedivost do (inter)nacionalnih standarda predstavljena Hrvatskoj akreditacijskoj agenciji (HAA). HAA je potpisnik Multilateralnog sporazuma Europske organizacije za akreditaciju (EA) o uzajamnom priznavanju izvješća o ispitivanju i potvrda o umjeravanju.

*The measurements have been executed using standards for which the traceability to (inter)national standards has been demonstrated towards the Croatian Accreditation Agency (HAA). HAA is a signatory of the Multi Lateral Agreement of the European Co-operation for Accreditation (EA) for mutual recognition of test reports and calibration certificates.*

**Uvjeti okoliša:**  
*Environmental conditions*

<b>Temperatura zraka</b> <i>Air temperature</i>	<b>19,7 – 23,7 (°C)</b>
<b>Relativna vlažnost zraka</b> <i>Relative humidity</i>	<b>20 – 22 (%)</b>
<b>Tlak zraka</b> <i>Air pressure</i>	<b>1004 – 1014 (hPa)</b>


Ova POTVRDA O UMJERAVANJU ne smije se preslikavati, osim u cijelosti, bez pismenog odobrenja Samostalne službe za umjerni laboratorij.  
 This CERTIFICATE OF CALIBRATION may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the Calibration Laboratory.

 Oznaka: MLQP-5.9.1.5-16  
Izdavanje: 03/2017

Slika 25 – Potvrda o umjeravanju, DHMZ (2/3)



**DRŽAVNI  
HIDROMETEOROLOŠKI  
ZAVOD**



**SAMOSTALNA  
SLUŽBA ZA UMJERNI  
LABORATORIJ**

Str. 3  
Page

---

**POTVRDA O UMJERAVANJU br. 55/17**  
*Certificate of calibration No.*

---

**Rezultati umjeravanja:**  
*Calibration results*

Br. No.	Referentni uređaj <i>Reference (hPa)</i>	Ispitivani uređaj (P1) <i>Test object (hPa)</i>	Odstupanje (ΔP1) <i>Deviation (hPa)</i>	Ispitivani uređaj (P2) <i>Test object (hPa)</i>	Odstupanje (ΔP2) <i>Deviation (hPa)</i>	Mjerna nesigurnost <i>Measurement uncertainty (hPa)</i>
1.	509,27	509,63	-0,36	509,67	-0,40	0,09
2.	558,93	559,28	-0,35	559,31	-0,38	0,09
3.	617,37	617,70	-0,33	617,72	-0,35	0,09
4.	678,71	679,03	-0,32	679,04	-0,33	0,10
5.	737,16	737,46	-0,30	737,47	-0,31	0,10
6.	798,51	798,79	-0,28	798,80	-0,29	0,10
7.	859,86	860,13	-0,27	860,13	-0,27	0,11
8.	918,29	918,54	-0,25	918,55	-0,26	0,11
9.	979,65	979,87	-0,22	979,88	-0,23	0,11
10.	1038,07	1038,27	-0,20	1038,29	-0,22	0,12
11.	1087,74	1087,91	-0,17	1087,95	-0,21	0,12

**Mjerna nesigurnost:**  
*Measurement uncertainty*

Mjerna nesigurnost je izračunata prema  
 internom postupku MLQP-5.4.35.

Navedena povećana mjerna nesigurnost iskazana je kao standardna mjerna nesigurnost pomnožena faktorom pokrivanja  $k=2$ , što za normalnu raspodjelu odgovara vjerojatnosti pokrivanja od približno 95%. Standardna mjerna nesigurnost određena je sukladno publikaciji EA-4/02.

*The reported expanded uncertainty of measurement is stated as a standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor  $k=2$ , which for the normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. Standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with the publication EA-4/02.*

**Napomena:**  
*Remark*

**Kraj POTVRDE O UMJERAVANJU.**  
*End of CERTIFICATE OF CALIBRATION.*

---

Oznaka: MLQP-5.9.1.5-16  
Izdaje: 03/2017

Ova POTVRDA O UMJERAVANJU ne smije se preslikavati, osim u cijelosti, bez pismenog odobrenja Samostalne službe za umjerni laboratorij.  
 This CERTIFICATE OF CALIBRATION may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the Calibration Laboratory.

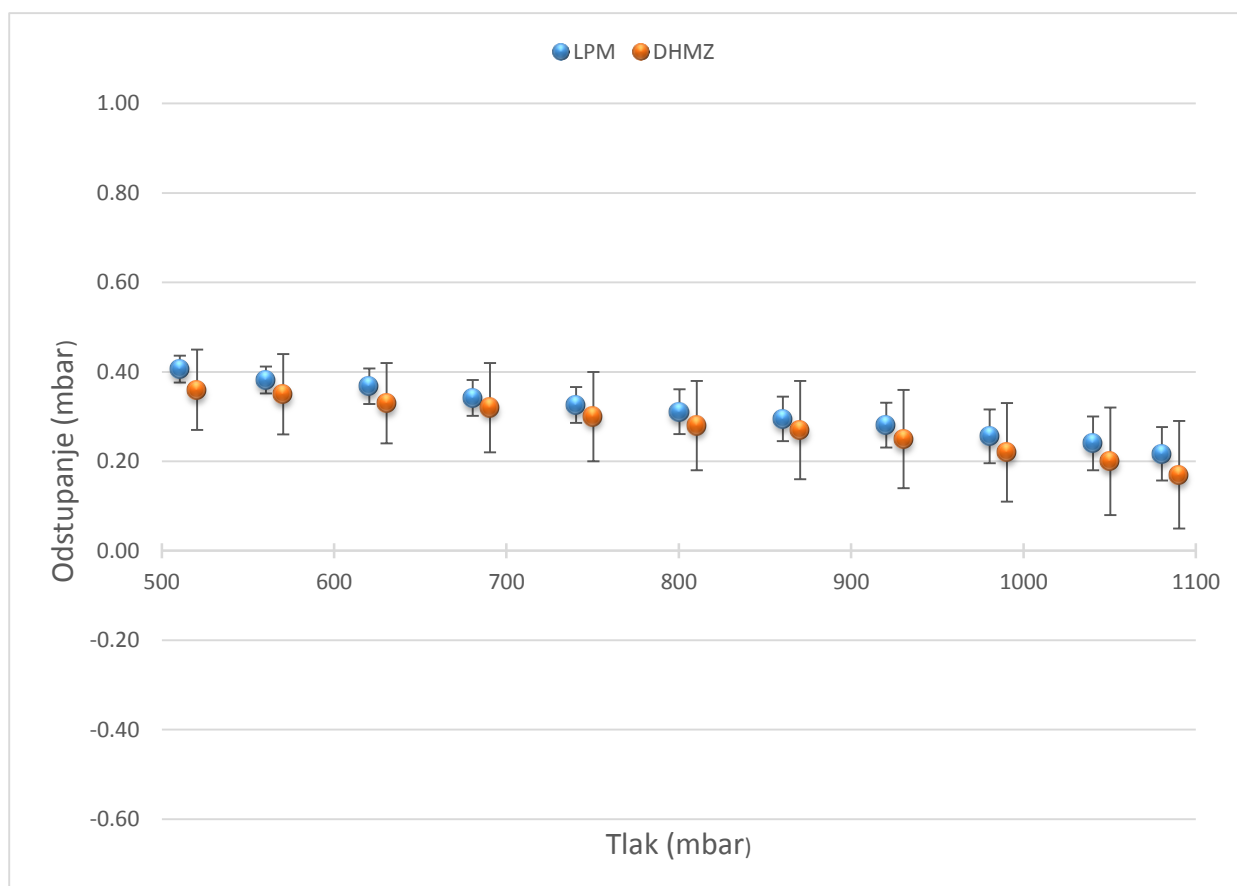
Slika 26 – Potvrda o umjeravanju, DHMZ (3/3)



Rezultati proračuna za P1 izlaz su prikazani u tablici 4 i na slici 27.

**Tablica 4 – Usporedba mjerne nesigurnosti i En vrijednosti za mjereni tlak P1**

R.broj	Nazivni tlak, $p_M$ , mbar	Odstupanje (LPM), mbar	Odstupanje (DHMZ), mbar	Nesigurnost umjeravanja (LPM), U, mbar	Nesigurnost umjeravanja (DHMZ), U, mbar	En
1	510	0,41	0,36	0,03	0,09	0,48
2	560	0,38	0,35	0,03	0,09	0,34
3	620	0,37	0,33	0,04	0,09	0,39
4	680	0,34	0,32	0,04	0,10	0,20
5	740	0,33	0,30	0,04	0,10	0,24
6	800	0,31	0,28	0,05	0,10	0,28
7	860	0,29	0,27	0,05	0,11	0,21
8	920	0,28	0,25	0,05	0,11	0,26
9	980	0,26	0,22	0,06	0,11	0,29
10	1040	0,24	0,20	0,06	0,12	0,30
11	1080	0,22	0,17	0,06	0,12	0,35

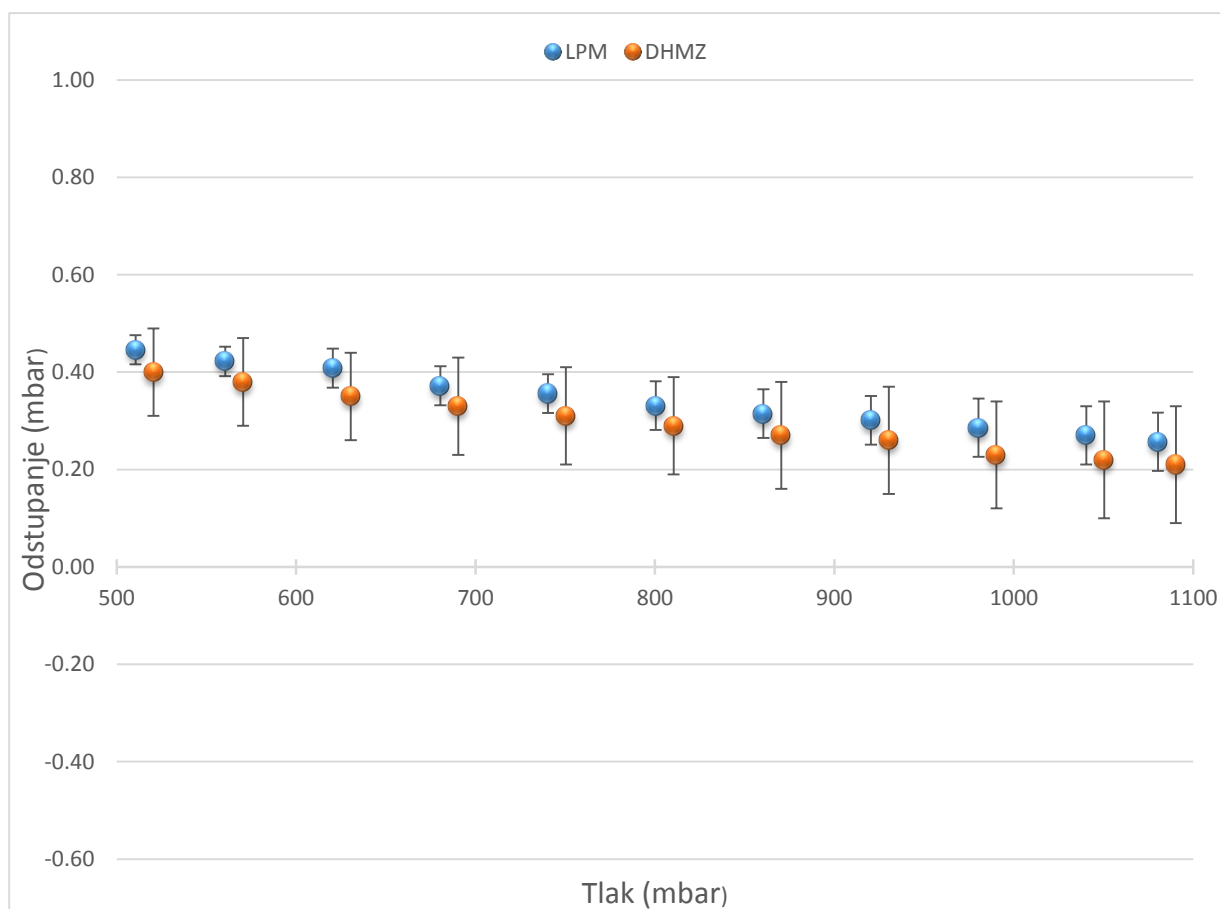


**Slika 27 – Usporedba odstupanja i mjerne nesigurnosti za mjereni tlak P1**

Rezultati proračuna za P2 izlaz prikazani su u tablici 5 i na slici 28.

**Tablica 5 – Usporedba mjerne nesigurnosti i En vrijednosti za mjereni tlak P2**

R.broj	Nazivni tlak, $p_M$ , mbar	Odstupanje (LPM), mbar	Odstupanje (DHMZ), mbar	Nesigurnost umjeravanja (LPM), U, mbar	Nesigurnost umjeravanja (DHMZ), U, mbar	En
1	510	0,45	0,40	0,03	0,09	0,48
2	560	0,42	0,38	0,03	0,09	0,44
3	620	0,41	0,35	0,04	0,09	0,59
4	680	0,37	0,33	0,04	0,10	0,39
5	740	0,36	0,31	0,04	0,10	0,43
6	800	0,33	0,29	0,05	0,10	0,37
7	860	0,31	0,27	0,05	0,11	0,37
8	920	0,30	0,26	0,05	0,11	0,34
9	980	0,29	0,23	0,06	0,11	0,45
10	1040	0,27	0,22	0,06	0,12	0,37
11	1080	0,26	0,21	0,06	0,12	0,35



**Slika 28 – Usporedba odstupanja i mjerne nesigurnosti za mjereni tlak P2**

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je dan pregled osnovne metodologije mjerenja tlaka, s posebnim naglaskom na mjerenje tlaka okoline, te su opisani karakteristični barometri i njihov princip rada. Nadalje, definiran je pojam mjerne nesigurnosti, te je dan pregled smjernica za umjeravanje prema DKD-u i EURAMET-u. Smjernice predstavljaju važan dio postupka umjeravanja jer se njima utvrđuju minimalni zahtjevi za postupak umjeravanja i procjenu mjerne nesigurnosti mjernih instrumenata. Također, njihova primjena je stavljena u kontekst međulaboratorijskih usporedbi, gdje čine njezin sastavni dio te omogućuju uzajamno priznavanje rezultata dobivenih umjeravanjem diljem Europe. Nadalje, objašnjena je uloga Hrvatske akreditacijske agencije i zahtjevi koji su potrebni za dobivanje akreditacije. Potvrda o akreditaciji predstavlja bitnu stavku svakog laboratorija jer se njome službeno dokazuje kompetentnost za obavljanje određenih mjerenja, ispitivanja ili slično, odnosno predstavlja svojevrsno priznanje kvalitete rada i tehničkih mogućnosti neke institucije.

Osim toga, u radu je prikazana bilateralna usporedba mjerenja apsolutnog tlaka u području od 500 do 1100 hPa između Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (LPM) i umjernog laboratorija Državnog hidrometeorološkog zavoda. Predmet umjeravanja je bio digitalni barometar proizvođača Vaisala, a umjeravanje je provedeno za oba ulaza mjernog instrumenta, P1 i P2. Rezultati su međusobno uspoređeni u svrhu određivanja preciznosti metoda mjerenja apsolutnog tlaka te procjene sposobnosti sudioničkih laboratorija za obavljanje određenih metoda mjerenja. Analiza rezultata pokazuje da oba laboratorija zadovoljavaju kriterije prihvatljivosti jer su im apsolutni iznosi  $E_n$  vrijednosti manji od 1. Također, vidljivo je i da su iznosi mjernih nesigurnosti LPM-a manji od onih kod umjernog laboratorija DHMZ-a što je pokazatelj kvalitetnije metode umjeravanja.

Konačno, grafička usporedba ukazuje na logičan trend raspodjele rezultata kroz sve mjerne točke za oba mjerila tlaka, P1 i P2. Najveća odstupanja se pojavljuju kod najmanjih vrijednosti nazivnog tlaka, dok su najveći iznosi izračunatih mjernih nesigurnosti zabilježeni kod najvećih vrijednosti nazivnog tlaka.

---

**LITERATURA**

- [1] WIKA-Handbook, *Pressure and Temperature Measurement U.S. Edition*, 2008.
- [2] Runje, B.: Podloge za predavanja iz kolegija *Mjeriteljstvo*, 2015.
- [3] Howarth, P., Redgrave, F.: *Metrology – in short, 3rd edition*, EURAMET Project 1011, PTB Germany, 2008.
- [4] Galović, A.: *Termodinamika 1*, Zagreb 2011.
- [5] The Institute of Measurement and Control: *Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum*, 1998.
- [6] Zvizdić, D., Grgec Bermanec, L.: Podloge za predavanja iz kolegija *Toplinska i procesna mjerenja*, 2015.
- [7] Pavese, F., Molinar, M., B., G.: *Modern Gas-Based Temperature and Pressure Measurements*, 2nd Edition, Springer, 2013.
- [8] Harrison, G, R.: *Meteorological Measurements and Instrumentation*, Wiley Blackwell, 2015.
- [9] Technical brochure, *Vaisala BAROCAP Sensor for Measuring Pressure*, 2012.
- [10] Japan Meteorological Agency: *Calibration of Barometers (Theory and Practice)*, 2013.
- [11] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100:2008
- [12] DKD-R 6-1 Guideline, *Calibration of Pressure Gauges*, 03/2014.
- [13] Taylor, B., K., Kuyatt, C., E.: *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*, NIST Technical Note 1297, 1994.
- [14] <https://www.euramet.org/about-euramet/> (Pristupljeno: srpanj 2017.)
- [15] EURAMET, *Guidelines on the Calibration of Pressure Balances*, EURAMET cg-3, ožujak 2011.
- [16] EURAMET, *Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers*, EURAMET cg-17, travanj 2017.
- [17] HAA, *Pravila za međulaboratorijske usporedbe*, HAA-Pr-2/6, srpanj 2015.
- [18] EURAMET, *Guide on Comparisons*, svibanj 2016.
- [19] CIPM MRA-D-05: *Measurement comparisons in the CIPM MRA*, 2016.
- [20] <http://www.svijet-kvalitete.com/index.php/akreditacija/629-predstavljamo-haa> (Pristupljeno: srpanj 2017.)
- [21] Zvizdić, D., Grgec Bermanec, L., Stašić, T.: *Development of absolute mode pressure standard in the range from 25 kPa up to 2 MPa*, 19<sup>th</sup> Metrology symposium, 2005.

- [22] Grgec, Bermanec, L., Steindl, D., Prazak., D., Altintas, A., Lefkopoulos, A., Sandu, I., Spohr, I., Otal, P., Testa, N., Tammik, K., Saxholm, S., Šetina, J., Hetherington, P., Kocas, I.: *Comparison in the negative gauge pressure range -950 to 0 hPa*, EURAMET.M.P-S9/EURAMET 1170, LOOP1, 2013.

---

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc